

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA RESINA EPÓXI DE COLAGEM DE ADUELAS PRÉ-FABRICADAS DE PONTES

(Tensões nas Interfaces de Colagem de Aduelas
Durante o Processo Construtivo)

KATERYNA KOMAR

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Pedro Álvares Ribeiro do Carmo Pacheco

Coorientador: Engenheiro André Filipe de Bastos Resende

JULHO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha pequena Princesa

Everything should be made as simple as possible, but not simpler.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui uma palavra de agradecimento a todos os que direta ou indiretamente tornaram possível a concretização deste trabalho, em particular:

Ao Professor Doutor Pedro Pacheco, meu orientador científico, pela disponibilidade e apoio que sempre demonstrou, bem como pela qualidade das suas críticas, sugestões e incentivos que contribuíram para a concretização deste trabalho.

Ao Engenheiro André Resende, meu coorientador, pelo apoio prestado, críticas, sugestões e toda a sua paciência e disponibilidade no esclarecimento de dúvidas que foram surgindo ao longo do trabalho.

Ao Engenheiro Alberto Torres, pela sua disponibilidade e prestabilidade sempre que solicitada a sua colaboração, assim como todas as críticas, sugestões e conselhos ao trabalho realizado.

À minha mãe e à minha avó, por todo o amor, carinho, apoio e valores com que sempre me apresentaram ao longo de toda a minha existência e que me tornaram na pessoa que sou hoje.

À minha menina pela motivação, amor e carinho.

Aos meus amigos e colegas que me acompanharam e apoiaram ao longo destes anos.

RESUMO

O principal assunto da presente dissertação consiste no estudo de tensões nas interfaces de colagem de aduelas pré-fabricadas e consequentemente no comportamento da resina epóxi.

O primeiro assunto apresentado compreende a descrição do estado da arte da construção de pontes construídas com aduelas pré-fabricadas, abordando inicialmente a origem e o desenvolvimento de engenharia de pontes, seguidos pela descrição dos métodos de execução de tabuleiros e equipamentos frequentemente utilizados.

De modo a sistematizar as particularidades da construção de pontes construídas com aduelas pré-fabricadas apresentam-se algumas sugestões de iniciação de construção e principais métodos de produção de aduelas. Abordam-se os assuntos relacionados com o armazenamento, transporte e controlo geométrico das aduelas. Nesse contexto descrevem-se também as principais características das juntas. Analisam-se ainda algumas questões relacionadas com o dimensionamento longitudinal e o comportamento sísmico de tabuleiros construídos com recurso a aduelas pré-fabricadas.

A clarificação do assunto de segurança e comportamento estrutural de juntas entre aduelas pré-fabricadas inicia-se pela descrição das principais causas de incremento de tensões. Aborda-se o conceito de resina epóxi, principiado pela sua definição, seguido pelo processo de desenvolvimento de aplicação na colagem de aduelas, com um exemplo prático do seu comportamento. Descrevem-se as principais propriedades físicas e mecânicas da resina epóxi, bem como alguns conselhos práticos durante a sua aplicação e regulamentação aplicável aos requisitos de desempenho.

No mesmo âmbito elaboram-se o estudo do processo construtivo da Ponte Laguna, que por sua vez inicia-se com a simulação do processo construtivo, descrição da obra, das características do equipamento utilizado e do desenvolvimento de operações. De seguida apresentam-se as etapas do procedimento de cálculo, que posteriormente permitem o estudo de influência da variação do peso próprio das aduelas no incremento de tensões nas interfaces.

PALAVRAS-CHAVE: aduelas pré-fabricadas, tensões nas interfaces, juntas entre aduelas, resina epóxi, procedimento construtivo.

ABSTRACT

The main subject of this dissection is to the study of the stress present in precast segments bonding interfaces and consequently the behavior of the epoxy resin.

The first presented subject is a description on the state of the art construction of bridges built with precast segments, initially covering the origin and development of bridges engineering, followed by a description of the construction procedures and other commonly used equipment.

In order to systematize the particularities of bridge building process using precast segments some suggestions are presented for the initial construction process, along with the main casting methods, furthermore, storage, transport and geometry control is also addressed, in this context it is also described the main features of joints. Some issues related to the longitudinal design and the seismic behavior of boards built using prefabricated segments were analyzed.

Clarification of security issues and structural behavior of joints between precast segments begins by describing the main causes of increasing tensions. The concept of epoxy resin is addressed, mainly by its definition, followed by the development process in segments bonding application, with a practical example of their behavior. The main physical and mechanical properties of epoxy resin are described, as well as some practical advice during its application and finally rules on performance requirements.

In the same context a study of the construction process of Laguna Bridge was drawn up, which starts with the simulation of said construction process, description of the construction work, the properties of the equipment and development operations. Following are the procedure steps for the design calculation, which later enables the study of the influence on the variation of the staves own weight in the increase of tensions in interfaces.

KEYWORDS: Precast segments, tensions in interfaces, joints between precast segments, epoxy resin, construction process.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE GERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE QUADROS	XV
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS.....	XVII

1. INTRODUÇÃO..... 1

1.1. CONTEXTO E IMPORTÂNCIA DO TEMA	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2

2. ESTADO DA ARTE DE PONTES CONSTRUÍDAS POR ADUELAS PRÉ-FABRICADAS.....5

2.1. BREVE RESENHA HISTÓRICA	5
2.2. PONTES CONSTRUÍDAS POR ADUELAS PRÉ-FABRICADAS TRAMO A TRAMO.....	8
2.2.1. ENQUADRAMENTO	8
2.2.1.1. Sistema I	9
2.2.1.2. Sistema II	9
2.2.1.3. Sistema III	10
2.2.2. PRINCIPAIS MÉTODOS DE CONSTRUÇÃO	11
2.2.2.1. Lançadeira.....	11
2.2.2.2. Cimbre ao Solo.....	12
2.3. PONTES CONSTRUÍDAS POR AVANÇOS SUCESSIVOS COM ADUELAS PRÉ-FABRICADAS	13
2.3.1. ENQUADRAMENTO	13
2.3.2. PRINCIPAIS MÉTODOS DE CONSTRUÇÃO	16
2.3.2.1. Colocação com Recurso a Grua	16
2.3.2.2. Colocação com Recurso a Lançadeira	17
2.3.2.3. Içamento com Carros de Avanço	18
2.4. PONTES CONSTRUÍDAS COM RECURSO A TIRANTES	19

2.4.1. ENQUADRAMENTO	19
2.4.2. PRINCIPAIS MÉTODOS DE CONSTRUÇÃO	19
2.4.2.1. Tirantes Provisórios	19
2.4.2.2. Tirantes Definitivos	20
2.5. PRINCIPAIS VANTAGENS E DESVANTAGENS DE CONSTRUÇÃO DE PONTES COM ADUELAS PRÉ-FABRICADAS	21

3. PARTICULARIDADES DE CONSTRUÇÃO DE PONTES COM ADUELAS PRÉ-FABRICADAS 23

3.1. INICIAÇÃO DE CONSTRUÇÃO	23
3.2. MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE ADUELAS	24
3.2.1. MÉTODO DE LINHA LONGA	24
3.2.2. MÉTODO DE LINHA CURTA	25
3.3. ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE DE ADUELAS.....	27
3.4. CONTROLO GEOMÉTRICO DE ADUELAS	28
3.4.1. CURVA DE FABRICO	28
3.4.2. CONTROLO GEOMÉTRICO DURANTE A PRÉ-FABRICAÇÃO.....	30
3.4.3. CONTROLO GEOMÉTRICO DURANTE A MONTAGEM DAS ADUELAS	33
3.5. CARACTERÍSTICAS DAS JUNTAS ENTRE ADUELAS PRÉ-FABRICADAS.....	35
3.5.1. MÉTODOS DE CÁLCULO DE JUNTAS.....	36
3.5.1.1. Modelos de Calculo	36
3.5.1.2. Ensaio e Verificação Numérica.....	37
3.5.1.3. Modelo de Dimensionamento Proposto por <i>Rombach</i>	38
3.5.2. TIPOS DE JUNTAS.....	41
3.6. DIMENSIONAMENTO LONGITUDINAL.....	42
3.6.1. ESTADO LIMITE DE UTILIZAÇÃO	42
3.6.2. ESTADO LIMITE ÚLTIMO	43
3.6.3. METODOLOGIAS DE ANÁLISE.....	44
3.6.3.1. Análise Elástica	44
3.6.3.2. Análise Plástica	44
3.6.3.3. Análise não Linear com Modelação por Elementos Finitos	44
3.6.4. PRÉ-ESFORÇO LONGITUDINAL	48
3.7. PARTICULARIDADES DE COMPORTAMENTO SÍSMICO.....	49
3.7.1. ENQUADRAMENTO	49

3.7.2. COMPORTAMENTO DAS JUNTAS ENTRE ADUELAS PRÉ-FABRICADAS FACE A AÇÃO SÍSMICA	50
--	----

4. SEGURANÇA E COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS JUNTAS 51

4.1. PRINCIPAIS CAUSAS DE INCREMENTO DAS TENÇÕES NAS JUNTAS 51

4.1.1. SOBRECARGAS DE CONSTRUÇÃO	51
--	----

4.1.2. DEFORMAÇÃO DO EQUIPAMENTO CONSTRUTIVO	51
--	----

4.1.3. EFEITO DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA.....	52
---	----

4.1.4. DEFICIENTE CONTROLO GEOMÉTRICO	53
---	----

4.1.5. DEFEITOS NAS SUPERFÍCIES DE CONTACTO	53
---	----

4.1.6. FATOR DO ERRO.....	54
---------------------------	----

4.1.6.1. Tipos de Erros	54
-------------------------------	----

4.1.6.2. Erro Humano	55
----------------------------	----

4.2. RESINA EPÓXI..... 55

4.2.1. DEFINIÇÃO.....	55
-----------------------	----

4.2.2. DESENVOLVIMENTO DE APLICAÇÃO DE RESINAS EPÓXI NA COLAGEM DE ADUELAS	56
--	----

4.2.2.1. Importância da Resina Epóxi no Processo de Colagem de Aduelas de Primeira Geração	57
---	----

4.2.2.2. Importância da Resina Epóxi no Processo de Colagem de Aduelas de Segunda Geração ...	57
---	----

4.2.3. EXEMPLO PRÁTICO DO COMPORTAMENTO DAS JUNTAS	57
--	----

4.2.4. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS	60
---	----

4.2.4.1. Propriedades Físicas.....	60
------------------------------------	----

4.2.4.2. Propriedades Mecânicas.....	63
--------------------------------------	----

4.2.5. APLICAÇÃO DE RESINAS EPÓXI NA COLAGEM DE ADUELAS	65
---	----

4.2.6. REGULAMENTAÇÃO APLICÁVEL AOS REQUISITOS DE DESEMPENHO	66
--	----

4.3. CASO DE ESTUDO – PONTE LAGUNA..... 67

4.3.1. SIMULAÇÃO DO PROCESSO CONSTRUTIVO	67
--	----

4.3.1.1. Descrição da Obra a Executar	67
---	----

4.3.1.2. Descrição do Processo Construtivo	68
--	----

4.3.1.3. Descrição do Equipamento Construtivo.....	69
--	----

4.3.1.4. Sistema OPS.....	71
---------------------------	----

4.3.1.5. Interação de Efeitos e Transferência de Carga	72
--	----

4.3.2. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO	72
--------------------------------------	----

4.3.2.1. Modelo de Cálculo ROBOT.....	72
---------------------------------------	----

4.3.2.2. Princípios Associados ao Método Construtivo	75
4.3.2.3. Avaliação de Dados.....	75
4.3.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS	77
4.3.3.1. Secção Transversal.....	78
4.3.3.2. Momentos Fletores Resultantes do Procedimento de Posicionamento de Aduelas	79
4.3.3.3. Momentos Fletores Resultantes do Procedimento de Transferência de Carga	81
4.3.3.4. Atuação do Sistema OPS.....	85
4.3.3.5. Tensões Finais	88

5. CONCLUSÕES 93

5.1. CONCLUSÕES.....	93
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	94

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 95

ANEXOS..... 99

ANEXO A – PESO PRÓPRIO DE ADUELAS PREVISTO EM PROJETO	100
ANEXO B – PESO PRÓPRIO DE ADUELAS PREVISTO EM PROJETO + DESVIO DE 5%	105
ANEXO C – PESO PRÓPRIO DE ADUELAS PREVISTO EM PROJETO - DESVIO DE 5%	110
ANEXO D – GRÁFICOS	115

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 2.1. - PONS SUBLICIUS – “PONTE DE ESTACAS” [58].	5
FIG. 2.2. - PONTE DE VILA FORMOSA EM PORTALEGRE [69].	6
FIG. 2.3. - PONTE VECCHIO, FLORENÇA [70].	7
FIG. 2.4. - VIADUTO DE GOLTZSCH [71].	8
FIG. 2.5. - SISTEMA I [31].	9
FIG. 2.6. - SISTEMA II [31].	10
FIG. 2.7. - SISTEMA III [31].	10
FIG. 2.8. – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE JUNTA COM LAJE DE BETÃO ARMADO [31].	11
FIG. 2.9. – LANÇADEIRA INFERIOR [49].	11
FIG. 2.10. - LANÇADEIRA SUPERIOR [50].	12
FIG. 2.11. – CIMBRE AO SOLO [51].	13
FIG. 2.12. – ESQUEMA DE EXECUÇÃO DE PONTE POR AVANÇOS SUCESSIVOS COM ADUELAS PRÉ-FABRICADAS [14].	14
FIG. 2.13. - PONTE SOBRE O RIO SENA EM CHOISY-LE-ROI [60].	14
FIG. 2.14. - VIADUTO D'OLERON, FRANÇA [61].	15
FIG. 2.15. – COLOCAÇÃO DE ADUELA COM RECURSO A GRUA [62].	16
FIG. 2.16. – CONSTRUÇÃO POR AVANÇOS SUCESSIVOS COM RECURSO A LANÇADEIRA [63].	18
FIG. 2.17. - IÇAMENTO COM CARROS DE AVANÇO [64].	19
FIG. 2.18. – CONSTRUÇÃO COM TIRANTES PROVISÓRIOS [65].	20
FIG. 2.19. – CONSTRUÇÃO COM TIRANTES DEFINITIVOS [72].	21
FIG. 3.1. – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MÉTODO DE LINHA LONGA DE FABRICO [39].	25
FIG. 3.2. - SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO DO MÉTODO DE LINHA LONGA DE FABRICO [39].	25
FIG. 3.3. - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MÉTODO DE LINHA CURTA DE FABRICO [39].	26
FIG. 3.4. – COFRAGEM TIPO DO MÉTODO DE LINHA CURTA [39].	26
FIG. 3.5. – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE PONTOS DE APOIO PARA O ARMAZENAMENTO DE ADUELAS [18].	27
FIG. 3.6. – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ARMAZENAMENTO DE ADUELAS EM DUAS CAMADAS [18].	27
FIG. 3.7. – DEFINIÇÃO TIPO DA CURVA DE FABRICO.	29
FIG. 3.8. - ESQUEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE CONTROLO GEOMÉTRICO NA FABRICAÇÃO DE ADUELAS PELO MÉTODO DE LINHA CURTA [18].	31
FIG. 3.9. - ESQUEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE CONTROLO GEOMÉTRICO NA FABRICAÇÃO DE ADUELAS PELO MÉTODO DE LINHA CURTA [18].	31
FIG. 3.10. – ESQUEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE CONTROLO GEOMÉTRICO [25].	33

FIG. 3.11. – EFEITO DE ACUMULAÇÃO DE ERROS SISTEMÁTICOS [18].	35
FIG. 3.12. – FORÇAS ATUANTES NUMA ADUELA TIPO DURANTE A MONTAGEM.	35
FIG. 3.13. – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS ÁREAS DA EQUAÇÃO 2 [41].	36
FIG. 3.14. – REPRESENTAÇÃO DE ÁREA EFETIVA DE ATRITO SEGUNDO REGULAMENTO ALEMÃO [41].	37
FIG. 3.15. – REPRESENTAÇÃO DO PROVETE E DE MODELO DE CÁLCULO [41].	37
FIG. 3.16. – CURVAS CARGA-DEFORMAÇÃO [41].	38
FIG. 3.17. – REPRESENTAÇÃO DAS ÁREAS DE CÁLCULO [41].	39
FIG. 3.18. – COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES MODELOS DE CÁLCULO PARA UMA ADUELA-TIPO [41].	40
FIG. 3.19. – TIPOS DE JUNTAS MAIS COMUNS [41].	41
FIG. 3.20. – MODELAÇÃO DE ADUELA COM CHAVES POR ELEMENTOS FINITOS [41].	45
FIG. 3.21. – MODELAÇÃO DO TABULEIRO POR ELEMENTOS FINITOS COM REPRESENTAÇÃO DA ABERTURA DAS JUNTAS [41].	45
FIG. 3.22. – MODELAÇÃO DO TABULEIRO E CABOS DE PRÉ-ESFORÇO POR ELEMENTOS FINITOS [41].	45
FIG. 3.23. – REPRESENTAÇÃO DA ABERTURA DE JUNTAS [41].	46
FIG. 3.24. – VÃO DA "SECOND STAGE EXPRESSWAY SYSTEM IN BANGKOK, THAILAND". [40].	46
FIG. 3.25. – SECÇÃO TRANSVERSAL TIPO DA "SECOND STAGE EXPRESSWAY SYSTEM IN BANGKOK, THAILAND" [41].	47
FIG. 3.26. - COMPARAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO ESTRUTURAL REAL E OS RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA [41].	47
FIG. 4.1. – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA ADUELA PRÉ-FABRICADA FACE À AÇÃO TÉRMICA DIFERENCIAL.	53
FIG. 4.2. - ESTRUTURA MOLECULAR DA RESINA EPÓXI [32].	56
FIG. 4.3. – MODELO UTILIZADO NO ENSAIO (UNIDADES EM METROS).	58
FIG. 4.4. – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA DIAGONAL DE TENSÕES PRINCIPAIS DE COMPRESSÃO.	58
FIG. 4.5. – CONCEITO DE TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇOS ENTRE ADUELAS (ÚNICA CHAVE VS. MÚLTIPLAS).	59
FIG. 4.6. – ADUELA COM MÚLTIPLAS CHAVES [67].	60
FIG. 4.7. – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA AGULHA DE VICAT [39].	62
FIG. 4.8. – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MEDIDOR DE DANIEL [39].	63
FIG. 4.9. – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROVETE MISTO [39].	64
FIG. 4.10. – EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DO MÓDULO DE DISTORÇÃO [39].	64
FIG. 4.11. – APLICAÇÃO DA RESINA EPÓXI [43].	66
FIG. 4.12. – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM VÃO.	68
FIG. 4.13. - LG50 – MÉTODO “TRAMO A TRAMO”.	69
FIG. 4.14. – MODELO TRIDIMENSIONAL DA TRELIÇA LANÇADEIRA LG50.	70
FIG. 4.15. - ALÇADO DA LANÇADEIRA LG50 – IDENTIFICAÇÃO DOS COMPONENTES PRINCIPAIS.	70

FIG. 4.16. – SISTEMA OPS.	71
FIG. 4.17. - MODELO DE LANÇADEIRA EM ESTUDO (MODELAÇÃO ROBOT).	73
FIG. 4.18. – REPRESENTAÇÃO DA APLICAÇÃO DO PESO DE ADUELAS NA LANÇADEIRA.	73
FIG. 4.19. – REPRESENTAÇÃO DO EFEITO DE REPOSICIONAMENTO DA PONTE ROLANTE.	74
FIG. 4.20. – REPRESENTAÇÃO DA ATUAÇÃO DO SISTEMA OPS.	74
FIG. 4.21. – REPRESENTAÇÃO DA PONTE ROLANTE COM O RESPETIVO CABO DO GUINCHO.	74
FIG. 4.22. - DESENVOLVIMENTO DAS TENSÕES AO LONGO DO PROCEDIMENTO DE EXECUÇÃO DO VÃO (kPa).	78
FIG. 4.23. – SECÇÃO TRANSVERSAL DAS ADUELAS EM ANÁLISE.	79
FIG. 4.24. – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE PRÉ-SUSPENSÃO DE ADUELAS.	86
FIG. 4.25. – DESENVOLVIMENTO DAS TENSÕES NAS INTERFACES DURANTE O POSICIONAMENTO DE ADUELA 10.	86

ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO 1 – RESUMO DE PRINCIPAIS VANTAGENS E DESVANTAGENS DE CONSTRUÇÃO DE PONTES COM RECURSO A ADUELAS PRÉ-FABRICADAS [41].	21
QUADRO 2 – REPRESENTAÇÃO DE EFICIÊNCIA EM FUNÇÃO DA INCLINAÇÃO DA JUNTA.	59
QUADRO 3 - LIMITES TÉRMICOS PARA A TRABALHABILIDADE [39].	61
QUADRO 4 – EXEMPLO DE DURAÇÃO APROXIMADA DA VIDA ÚTIL DA RESINA EPÓXI SEGUNDO <i>PODOLNY ET AL</i> [39].	61
QUADRO 5 - CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS – PONTE SOBRE O CANAL DAS LARANJEIRAS.	67
QUADRO 6 – TESÕES RESULTANTES DO PROCEDIMENTO DE SUSPENSÃO + EFEITO OPS (kPa).	77
QUADRO 7 - VALORES DE TENSÕES DE COMPRESSÃO NA FIBRA SUPERIOR E INFERIOR.	79
QUADRO 8 - INCREMENTO DO MOMENTO FLETOR NAS INTERFACES PARA UM AUMENTO NO PESO DAS ADUELAS DE 5%.	80
QUADRO 9 - INCREMENTO DO MOMENTO FLETOR NAS INTERFACES PARA UMA DIMINUIÇÃO NO PESO DAS ADUELAS DE 5%.	81
QUADRO 10 - INCREMENTO DO MOMENTO FLETOR NAS INTERFACES PARA UM AUMENTO NO PESO DAS ADUELAS DE 5% (ANÁLISE DA FIBRA INFERIOR).	82
QUADRO 11 - INCREMENTO DO MOMENTO FLETOR NAS INTERFACES PARA UMA DIMINUIÇÃO NO PESO DAS ADUELAS DE 5% (ANÁLISE DA FIBRA INFERIOR).	83
QUADRO 12 - INCREMENTO DO MOMENTO FLETOR NAS INTERFACES PARA UM AUMENTO NO PESO DAS ADUELAS DE 5% (ANÁLISE DA FIBRA SUPERIOR).	84
QUADRO 13 - INCREMENTO DO MOMENTO FLETOR NAS INTERFACES PARA UMA DIMINUIÇÃO NO PESO DAS ADUELAS DE 5% (ANÁLISE DA FIBRA SUPERIOR).	85
QUADRO 14 – INCREMENTO DE TENSÕES NAS INTERFACES PARA UM AUMENTO NO PESO DAS ADUELAS DE 5% (FIBRA INFERIOR).	88
QUADRO 15 - INCREMENTO DE TENSÕES NAS INTERFACES PARA UM AUMENTO NO PESO DAS ADUELAS DE 5% (FIBRA SUPERIOR).	89
QUADRO 16 - INCREMENTO DE TENSÕES NAS INTERFACES PARA UMA DIMINUIÇÃO NO PESO DAS ADUELAS DE 5% (FIBRA INFERIOR).	90
QUADRO 17 - INCREMENTO DE TENSÕES NAS INTERFACES PARA UMA DIMINUIÇÃO NO PESO DAS ADUELAS DE 5% (FIBRA SUPERIOR).	91

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

a.C. – Antes de Cristo

d.C. – Depois de Cristo

n – Aduela a posicionar

$n-1$ – Aduela precedente a aduela a posicionar

e – Desvio no posicionamento de aduela [n]

E – Desvio total

V_j – Capacidade resistente de junta [MN]

σ_n – Compressão média na junta [MN]

A_k – Área mínima de todas as chaves no plano de rotura [m^2]

f_{ck} – Valor característico de compressão do betão aos 28 dias [MPa]

A_{sm} – Área entre chaves no plano de rotura [m^2]

A_T – Área efetiva de atrito [m^2]

$V_{d,j}$ – Capacidade resistente de junta seca [MN]

μ – Coeficiente de atrito

γ_F – Coeficiente de segurança

σ_n – Compressão média na zona da junta [MN]

A_{junta} – Área da junta em compressão [m^2]

b – Largura da alma [m]

A_{chave} – Área mínima de todas as chaves no plano de rotura [m^2]

h_{ne} – Altura das chaves [m]

$h_{ne,i}^r$ – Altura das chaves da face direita [m]

$h_{ne,i}^l$ – Altura das chaves da face esquerda [m]

b_n – Largura das chaves [m]

$V_{d,j}$ – Capacidade resistente de junta colada [MN]

τ – Tensão de corte [MPa]

β – Ângulo entre a tensão principal e o eixo neutro [$^\circ$]

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ELS – Estado Limite de Utilização/Serviço

ELU – Estado Limite Último

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

rpm – Rotações por minuto

FIB – *Fédération Internationale du Béton*

OPS – *Organic Prestressing System*

BERD – *Bridge Engineering Research & Design*

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO E IMPORTÂNCIA DO TEMA

A construção de pontes com recurso a aduelas pré-fabricadas ganha cada vez maior relevância no mundo da engenharia de pontes. Esse facto deve-se às inúmeras vantagens que o método apresenta relativamente a outras técnicas.

A execução de tabuleiros com aduelas pré-fabricadas surgiu como resultado da necessidade de utilização de métodos construtivos com elevado grau de rendimento, mecanização e menor quantidade de mão-de-obra necessária. Desta forma tornou-se possível a execução de superestruturas em períodos de tempo mais reduzidos, garantindo maior controlo de qualidade e melhor aproveitamento de materiais em comparação com a execução de tabuleiros *in-situ*. Outra motivação que levou ao crescimento da adoção desta tecnologia foi a sua boa adaptabilidade para a construção em ambientes densamente urbanizados.

O desenvolvimento, a conceção e a aplicação do método é notória por todo o mundo, embora em alguns países seja bastante mais aplicado do que em outros. Contudo, cada país apresenta as suas particularidades no que diz respeito ao processo construtivo, materiais e equipamentos utilizados. Esse facto deve-se as diferenças culturais, tendências de construção, condições climáticas e económicas.

Torna-se por isso de grande interesse aprofundar o estudo sobre o comportamento estrutural, não só durante a vida útil da estrutura, mas também na fase construtiva. Ao longo das últimas décadas foram realizados inúmeros estudos técnicos e científicos sobre os materiais e metodologias aplicadas na construção de pontes construídas com aduelas pré-fabricadas que, por sua vez, permitiram tornar a solução mais eficiente e viável.

Um dos aspetos de maior preocupação dos engenheiros de pontes passou a ser o dimensionamento e o controlo do comportamento das juntas entre aduelas durante o processo construtivo bem como durante a vida útil, visto ser um dos pontos mais sensíveis e importantes no desempenho estrutural.

As juntas por norma podem ser de dois tipos, um, com a aplicação de resinas e outro chamado junta seca. Ambos os sistemas são largamente usados na construção, apresentando cada um deles as suas vantagens e particularidades. Assim, torna-se de grande interesse o aprofundamento do estudo das tensões e dos esforços gerados nas interfaces entre as aduelas.

No que diz respeito às juntas elaboradas com a aplicação das resinas epóxi, é fulcral o controlo das tensões nas interfaces durante o processo construtivo de modo a evitar a fissuração da resina e garantir o bom desempenho da mesma durante a vida útil da estrutura.

Atualmente, o mercado oferece uma vasta gama de resinas, assim a escolha da mesma, bem como o dimensionamento das juntas é feito em função de vários aspetos externos como por exemplo as condições climáticas, o tipo do pré-esforço, os níveis das cargas, o método construtivo, entre outros. Cabe então ao projetista tomar a decisão adequada para cada caso.

1.2. OBJETIVOS

A presente dissertação procura apresentar uma plataforma de conceitos técnicos inerentes à construção de pontes com aduelas pré-fabricadas, dando maior ênfase ao estudo de tensões nas interfaces durante o processo construtivo e consequentemente ao comportamento de resina epóxi.

Em primeiro lugar elabora-se um estudo de estado de arte de construção de pontes com recurso a aduelas pré-fabricadas, ainda que não deixando de parte a abordagem histórica do conceito de engenharia de pontes.

De modo a enquadrar o leitor em todas as particularidades do conceito a abordar pretende-se descrever todas as particularidades inerentes, desde breves sugestões de iniciação de construção e métodos de produção de aduelas, até a alguns aspetos de dimensionamento longitudinal e particularidades de comportamento sísmico.

Pretende-se ainda aprofundar e consolidar os principais aspetos de segurança e comportamento estrutural das juntas entre aduelas durante a fase construtiva, abordando as principais causas do incremento de tensões.

Nesse sentido elabora-se um estudo aprofundado do conceito de resina epóxi utilizada na colagem de aduelas pré-fabricadas, bem como das suas propriedades físicas e mecânicas.

Intenta-se ainda elaborar um estudo prático acerca da construção de ponte com a metodologia de aduelas pré-fabricadas, que visa a mostrar o desenvolvimento de esforços durante a fase construtiva e a possibilidade do impacto de variação do peso próprio de aduelas nas tensões geradas e, consequentemente, na segurança e comportamento estrutural de juntas e da resina epóxi.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação apresentada contém cinco capítulos, sendo que o primeiro se destina à introdução contextual do trabalho.

No Capítulo 2 apresenta-se o estado de arte da construção de pontes construídas com aduelas pré-fabricadas, que começa por uma breve resenha histórica de engenharia de pontes, abordando as suas origens e o seu desenvolvimento, seguida da descrição de técnicas construtivas frequentemente usadas com o respetivo enquadramento e principais métodos de construção. Para finalizar no Capítulo 2 descrevem-se as principais vantagens e desvantagens de construção de pontes construídas com aduelas pré-fabricadas.

Ao longo do Capítulo 3 abordam-se as particularidades de construção de pontes com recurso a aduelas pré-fabricadas. Descrevem-se as sugestões de iniciação de construção, os principais métodos de pré-fabricação de aduelas e alguns aspetos acerca do seu armazenamento e transporte. No mesmo capítulo abordam-se ainda as questões associadas ao controlo geométrico, as características das juntas entre aduelas com algumas sugestões de cálculo, assim como ao dimensionamento longitudinal de tabuleiros e algumas particularidades do comportamento sísmico.

O principal enfoque do Capítulo 4 consiste na investigação de assuntos inerentes à segurança e comportamento estrutural das juntas entre aduelas. Em primeiro lugar abordam-se as principais causas de incremento de tensões nas juntas com apresentação de possíveis soluções a adotar.

Ainda no âmbito desse capítulo apresenta-se o conceito de resina epóxi iniciado pela sua descrição. Explicita-se o desenvolvimento da sua aplicação na colagem de aduelas pré-fabricadas, apresentando alguns exemplos práticos do comportamento das juntas. Abordam-se as principais características físicas e mecânicas. Descrevem-se ainda alguns conceitos de aplicação de resina epóxi na colagem de aduelas pré-fabricadas, bem como algumas notas acerca de regulamentação aplicável aos requisitos do seu desempenho.

De modo a clarificar o conceito de segurança e comportamento estrutural das interfaces de colagem de aduelas, o Capítulo 4 engloba ainda o estudo prático da construção da Ponte Laguna, que se inicia com a simulação do processo construtivo, descrevendo o tipo de obra em análise, o processo construtivo e os equipamentos utilizados, destacando também a aplicação do sistema OPS e a interação de efeitos de transferência de carga durante a execução da obra.

De seguida explica-se o procedimento de cálculo elaborado, referindo principais considerações dos programas computacionais utilizados, bem como os princípios associados ao método construtivo. Descreve-se o procedimento de avaliação de dados, seguido pela análise de resultados obtidos.

Para finalizar, no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões inerentes ao todo trabalho de pesquisa, bem como à investigação do caso prático, visando facilitar a racionalização do impacto de fatores de incremento de tensões nas juntas entre aduelas e, consequentemente do comportamento de resina epóxi.

2

ESTADO DA ARTE DE PONTES CONSTRUÍDAS POR ADUELAS PRÉ- FABRICADAS

2.1. BREVE RESENHA HISTÓRICA

Com a evolução da civilização romana nasceram os primordiais engenheiros civis da nossa civilização. No ano 621 a.C. foi edificada sobre o Rio Tibre uma das primeiras pontes romanas, chamada de *Pons Sublicius* – “Ponte de Estacas” representada na Figura 2.1. [28].



Fig. 2.1. - Pons Sublicius – “Ponte de Estacas” [58].

Conquanto, a construção de pontes em arco debutou a ser vastamente aplicada cerca de 300 anos depois, visto que essa tecnologia foi importada dos etruscos. A Ponte de Alcântara sobre o Rio Tejo na zona de Cáceres (Espanha) é um dos exemplos que chegou a atualidade, ainda que na sua construção não tenha sido aplicado nenhum tipo de argamassa, ou seja a resistência era conseguida apenas pela gravidade.

Os princípios teóricos de construção de pontes foram deduzidos pelos romanos através de um processo bastante rudimentar, que se baseava na tentativa e erro. Em geral, todas as pontes romanas detinham características bastante semelhantes, construídas dentro da lógica global do grande sistema de caminhos imperiais [12]. Destaca-se também a grande preocupação com a simetria e equilíbrio arquitetónico. Os arcos das pontes romanas são, na sua generalidade, de volta perfeita, com aduelas abundantemente largas consolidadas com ligantes. Os pilares, por sua vez expõem larguras de aproximadamente um quarto do vão dos arcos e o comprimento total dos tabuleiros.

Durante todo o processo de aprendizagem e desenvolvimento de novas técnicas para uma melhor construção, os romanos foram os primeiros a adicionar à cal, bastante usada pelos gregos, a pozolana, uma argila cozida pelo calor do vulcão, areia e água de modo a formar uma argamassa que não se desintegrava quando exposta à água [37]. Esta nova argamassa era usada como ligante nos pilares e arcos e como enchimento de fundações. Para a construção das fundações dos pilares das pontes, os romanos desenvolveram a técnica de elaboração de enscadeiras, na qual eram utilizadas estacas de madeira, que posteriormente eram colocadas no leito do rio de modo a permitir retirada de água, para de seguida, se iniciar a escavação do solo para a execução das fundações.

É de notar que para além das técnicas já citadas, os romanos desenvolveram complexos sistemas de cofragem e cimbres de forma a aperfeiçoar e tornar mais eficaz a sua construção [12]. Podemos afirmar que a Escola Romana marca o progresso da Engenharia de Pontes. Alguns dos exemplos de construção romana encontram-se em Portugal. Um dos melhores exemplos da presença romana no nosso país pode ser vislumbrado na Ponte de Vila Formosa em Portalegre (Figura 2.2.).



Fig. 2.2. - Ponte de Vila Formosa em Portalegre [69].

Após a queda do Império Romano no século V d.C., iniciou-se um período em que ocorreu um grande retrocesso na arte de construir pontes, perdendo-se também na mesma altura o segredo do cimento natural. No entanto, a argamassa de cal ordinária seria empregue com bastante frequência nas épocas seguintes.

A construção de pontes estagnou no início da Idade Média. Nesta época havia uma grande dependência na construção de pontes advinda não só das condições económicas e políticas, mas também em grande parte do conhecimento dos artesãos. O conhecimento que se dispunha nesta altura, nomeadamente dos artesãos sobre a construção de pontes romanas, era bastante rudimentar e provinha de ensinamentos transmitidos por monges. De diversas pontes da época podemos considerar como algumas das mais

marcantes a Ponte de Londres, construída em 1205 ou a Ponte *Vecchio*, construída em 1345 em Florença [28] (Figura 2.3.).



Fig. 2.3. - Ponte Vecchio, Florença [70].

Com o progresso no desenvolvimento da construção de pontes seguiram-se várias tentativas de alongar os arcos de modo a reduzir o número de vãos.

Durante a Idade Média e ao contrário do que se refletia no tempo dos romanos, não existia grande preocupação com a simetria e unidade arquitetônica na construção de pontes, o que estimulou a construção para a criação de um arco central substancialmente maior do que os laterais, transformando deste modo a geometria do tabuleiro em forma de cavalete.

As pontes medievais foram predominantemente construídas sem argamassa de ligação, pelo que o sistema construtivo privilegiava, essencialmente, o comportamento por gravidade considerando a pedra como elemento fundamental. Dava-se preferência à construção de arcos ogivais em vez de arcos semicirculares utilizados pelos romanos, visto que possibilitavam a execução de vãos maiores e mais altos, evitando assim a ação erosiva das correntes dos rios nas alturas de cheias.

Apenas na época Renascentista, e após um longo tempo em que o desenvolvimento na construção sofreu uma estagnação, foram dados alguns avanços na construção de pontes. Ao longo dos anos os engenheiros testaram várias maneiras para alongarem os arcos, tornando-os cada vez mais arrojados nas suas proporções. No entanto a forma como se alongaram os arcos depreendia um problema nos encontros. Os esforços eram cada vez maiores e tendiam a abrir o arco. A solução passou por se construir contrafortes nos encontros de modo a travar as extremidades [28]. Esses avanços ditaram uma nova tendência na construção de pontes, a construção de pontes com vãos maiores e pilares mais esbeltos, transmitindo uma sensação de leveza das estruturas.

A França é um dos países que mais contribuiu no desenvolvimento da Engenharia de Pontes, visto que proporcionou fundação do primeiro Departamento de Transportes, instituição responsável pela construção de pontes e estradas. Esta entidade impulsionou e muito a Engenharia de Pontes pois era formada por um grupo competente de engenheiros e arquitetos. Outro fator que contribuiu para este desenvolvimento, foi a fundação da primeira escola dentro da área de Engenharia Civil, chamada “*École Royale des Ponts et Chaussées*” em 1747 [37].

Com a explosão proporcionada pela Revolução Industrial no século XIX e com o constante desenvolvimento das redes ferroviárias como veículo de comunicação, os produtos metalúrgicos, como o ferro e o aço, tornaram-se cada vez de mais fácil obtenção, passando a ser um dos produtos mais utilizados na construção de pontes. Desenvolveu-se então um novo domínio na construção de pontes, as “pontes metálicas”, numa época onde ocorreram grandes avanços tanto a nível científico como tecnológico.

No final do século XIX, e ainda durante a fase de desenvolvimento de pontes metálicas, surge um novo material, o betão. Proporcionando-se assim a construção das primeiras pontes em betão armado.

Apesar dos muitos avanços realizados na construção de pontes, o uso de matérias primordiais na história das pontes, como o tijolo e a alvenaria de pedra nunca foram esquecidos, estando presentes na nossa construção até aos dias de hoje. Destaca-se o Viaduto de *Goltzsch*, como um exemplo, construído em 1845, na Alemanha, estendendo-se por cerca de 578 metros e alcançando uma altura de 78 metros [28] (Figura 2.4.).



Fig. 2.4. - Viaduto de Goltzsch [71].

Com o desenvolvimento dos viadutos ferroviários, as obras de arte começaram a ser cada vez mais ousadas no que diz respeito à esbelteza dos pilares.

Durante a época Renascentista foram feitos grandes trabalhos científicos mas que apenas vieram a ser devidamente capitalizados no século XVIII. No caso prático da construção de pontes, as teorias de resistência de materiais possibilitaram grandes evoluções. A evolução na construção foi notória em várias vertentes. Tanto os processos construtivos como os métodos de cálculo foram refinados tendo em conta vários anos de tentativas e a aplicação dos conhecimentos angariados, que por sua vez se traduziram numa construção de pontes de elevada complexidade.

2.2. PONTES CONSTRUÍDAS POR ADUELAS PRÉ-FABRICADAS TRAMO A TRAMO

2.2.1. ENQUADRAMENTO

A construção de pontes tramo a tramo, é frequentemente aplicada numa gama de vãos que vai de 20 a 60 metros de comprimento e de 5 a 24 metros de largura de plataforma (as larguras das plataformas poderão ser superiores a 24 m utilizando métodos construtivos complementares), com cujo peso do vão compreendido, na maior parte das vezes, entre 200 a 2000 toneladas. Contudo essa metodologia construtiva aplica-se de forma recorrente nos vãos de 30 a 50 metros, com um peso próprio de 200 a 1000 toneladas e com o peso das aduelas compreendido entre 30 a 150 toneladas [6].

A solução é executada através de tramos completos com recurso a cimbra ou lançadeira de aduelas. Durante a execução, cada segmento é posicionado e pré-suspenso no caso da lançadeira superior ou, no caso do cimbra e da lançadeira inferior, este é apoiado na sua posição final. Após a colocação de todas as aduelas do vão, é aplicado o pré-esforço longitudinal de modo a “assemblar” os segmentos oferecendo uma ligação monolítica entre eles, proporcionando assim e por consequência, a rigidez necessária, ficando o tabuleiro autoportante.

Este método construtivo pode ser diferenciado no modo como se procede à execução da aduela zero, isto é, a aduela que se situa em cima do pilar. Segundo *M. Meyer* [31], destacam-se assim três possíveis sistemas.

2.2.1.1. Sistema I

Estaticamente o sistema traduz-se por uma viga contínua de vários vãos. Cada tramo é erguido com posterior ativação do pré-esforço. As juntas por norma são executadas em cima do pilar. Os cabos de pré-esforço longitudinal não devem ser agrupados, por norma procede-se à sua sobreposição de modo a absorver o momento negativo em cima do apoio. De forma a se conseguir um ajuste mais eficiente em cima do apoio, devem executar-se juntas, que podem ser de betão, armado ou não, com uma espessura média de 200 mm.

O sistema apresenta uma vantagem bastante particular, na medida em que a execução de aduelas do vão é independente da execução da aduela sob o apoio, que por sua vez, é muitas vezes feita *in-situ*.

Esta solução (Figura 2.5.) é particularmente interessante quando se trata de construção de viadutos, visto que permite reduzir a amplitude das juntas de dilatação.

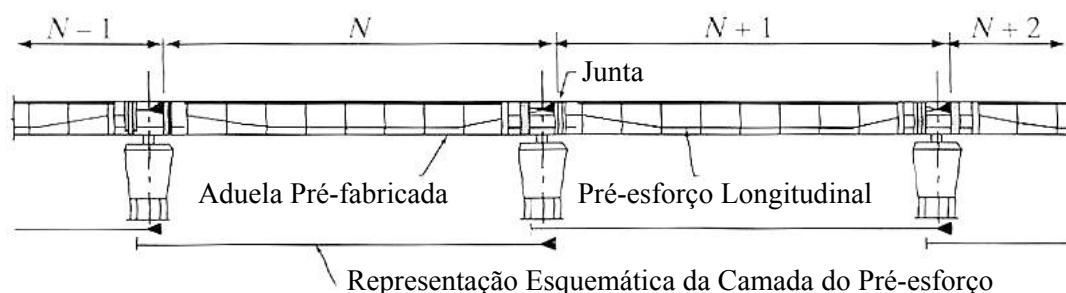


Fig. 2.5. - Sistema I [31].

2.2.1.2. Sistema II

Tal como acontece no Sistema I, no final da construção a estrutura traduz-se por uma viga contínua de vários tramos. Contudo durante a fase construtiva desta solução (Figura 2.6.) existem bastantes diferenças, nomeadamente no que diz respeito ao pré-esforço, uma vez que neste sistema o pré-esforço de cada vão é ativado como uma viga simplesmente apoiada nos aparelhos de apoio temporários até se executar a aduela sob o pilar. Posteriormente os apoios temporários dão lugar ao apoio definitivo sobre o pilar. A execução da aduela zero só é possível após o avanço da lançadeira, que por sua vez, tal como no Sistema I é frequentemente betonada *in-situ*. Após a betonagem da mesma procede-se à ativação do pré-esforço de continuidade.

A ativação do pré-esforço neste sistema é bem mais complexo, visto que a quantidade é maior e é disposta em várias camadas, com o consequente aumento do número de ancoragens.

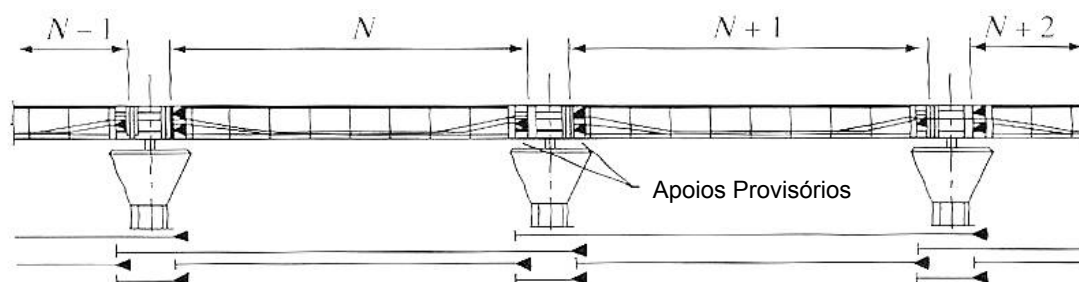


Fig. 2.6. - Sistema II [31].

2.2.1.3. Sistema III

Este sistema (Figura 2.7.) traduz-se por todos os vãos serem simplesmente apoiados, não só durante a primeira fase de ativação do pré-esforço, como após a ativação do pré-esforço de continuidade. Este método é o mais simples e mais rápido no que toca à produção e elevação de aduelas bem como à aplicação do pré-esforço.

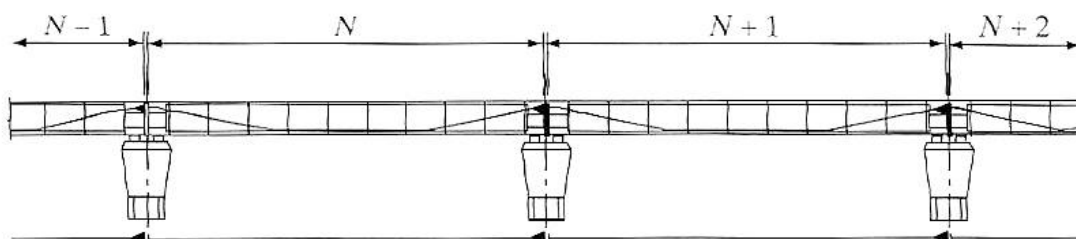


Fig. 2.7. - Sistema III [31].

A ligação entre a aduela zero e as aduelas adjacentes é caracterizada por sua rigidez. Esse facto faz com que o sistema apresente algumas desvantagens, tais como a necessidade de se executar várias juntas de dilatação assim como a necessidade de se instalar aparelhos de apoio que permitam os deslocamentos longitudinais do tabuleiro. A configuração da estrutura poderá ser bastante vantajosa no seu dimensionamento e na sua construção, visto que facilitará bastante o controlo dos esforços. Pese o facto de que a necessidade de colocação de juntas de dilatação possa prejudicar a exploração da obra, no caso de esta ser elaborada para o tráfego automóvel, visto que o conforto da condução será menor. É importante ter em consideração o número máximo de juntas permitido em pontes destinadas à circulação rodoviária. Ainda que, a necessidade de colocação de muitas juntas significa também que cada uma delas é mais pequena e simples. Há casos em que não é considerada uma junta clássica metálica, sendo antes colocada uma laje de betão armado que permite acomodar as dilatações do tabuleiro (Figura 2.8.).

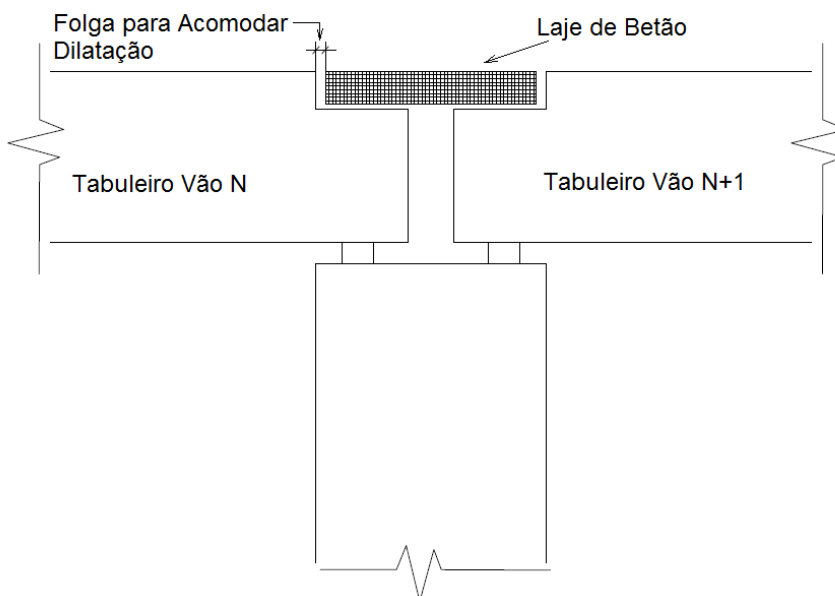


Fig. 2.8. – Representação esquemática de junta com laje de betão armado [31].

2.2.2. PRINCIPAIS MÉTODOS DE CONSTRUÇÃO

2.2.2.1. Lançadeira

Inicialmente as lançadeiras foram desenvolvidas para a execução de vãos compostos por vigas tipo caixão ou em “T” pré-fabricadas que se apoiavam diretamente nos aparelhos de apoio dos pilares.

Com o desenvolvimento da tecnologia de construção tornou-se possível a execução de tabuleiros com aduelas pré-fabricadas com recurso a lançadeiras superiores ou inferiores.



Fig. 2.9. – Lançadeira Inferior [49].

O processo construtivo inicia-se com o posicionamento da lançadeira (superior ou inferior) sobre os pilares (no mínimo são necessários dois apoios). Geralmente, existe necessidade de execução de furos no topo do pilar de modo a fixar os apoios da lançadeira. De seguida, no caso da lançadeira inferior

(Figura 2.9.), inicia-se o processo de colocação de aduelas entre duas vigas autolanzáveis que suportam o peso próprio das aduelas até ao esticamento dos cabos de pré-esforço [24].

No que diz respeito a utilização de lançadeira superior (Figura 2.10.), as aduelas permanecem suspensas na lançadeira até ao final de execução do vão. Depois do posicionamento de todas as aduelas, aplica-se o pré-esforço longitudinal e o vão é pousado nos apoios definitivos sob o pilar.

A colocação de aduelas pode ser feita com recurso à ponte rolante que ao avançar coloca as aduelas na sua posição final. As aduelas podem ser fornecidas tanto pelo tabuleiro já executado, como içadas da parte inferior. É de notar que, após o levantamento das aduelas, poderá ser necessário rodá-las 90° para permitir a sua passagem entre as vigas da lançadeira (inferior). As vigas são servidas de rolamentos para permitir a movimentação das aduelas [6] e os apoios da lançadeira permitem deslocamentos verticais, longitudinais e transversais para permitir o ajuste das vigas ao apoio [22].

Após a colocação de todas as aduelas do vão e aplicação do respetivo pré-esforço, a lançadeira avança para o próximo vão. Antes do avanço do equipamento é necessária a colocação dos apoios no pilar seguinte.



Fig. 2.10. - Lançadeira Superior [50].

2.2.2.2. Cimbres ao Solo

A elaboração de tabuleiros com a utilização de cimbres usualmente é aplicada à gama de vãos que vai de entre 20 a 40 m e com altura limitada [24]. Por norma, cimbres ao solo (Figura 2.11.) é a solução mais recorrente para execução de tabuleiros com aduelas pré-fabricadas, embora existam casos em que o cimbres é apoiado nos pilares, como por exemplo na construção do viaduto Duarte Pacheco na autoestrada Lisboa – Cascais, 1944. É importante referir que o cimbres traduz-se numa estrutura, embora temporária, mas que requer um adequado dimensionamento tendo em conta as ações a que vai estar exposta.



Fig. 2.11. – Cimbre ao Solo [51].

A construção inicia-se com a montagem do cimbre. De seguida, as aduelas são elevadas com recurso a uma grua ou outro tipo de equipamento adequado. Posteriormente as aduelas são colocadas na posição final a partir de uma extremidade. O peso das mesmas é suportado pelo cimbre até ao esticamento do pré-esforço. O controlo geométrico neste processo construtivo é feito com recurso a macacos hidráulicos ou rolamentos do cimbre [30].

Este método construtivo apresenta algumas vantagens, para além da possibilidade de ter várias frentes de trabalho, o facto de ter custo de aquisição relativamente reduzido, quando aplicado na execução de obras descritas acima, e em comparação com outros equipamentos construtivos. No entanto, aconselhe-se a aplicação da análise comparativa dos custos associados da construção de pontes e viadutos com recurso ao cimbre nos casos de estruturas de grande altura, extensão ou no caso do custo de mão-de-obra apresentar-se elevado.

2.3. PONTES CONSTRUÍDAS POR AVANÇOS SUCESSIVOS COM ADUELAS PRÉ-FABRICADAS

2.3.1. ENQUADRAMENTO

Antes do aparecimento da construção de pontes por aduelas ou segmentos, utilizavam-se vigas pré-fabricadas, paralelamente colocadas, lado a lado, em relação ao eixo longitudinal da ponte, para a posterior execução do tabuleiro [6]. Com o desenvolvimento do conceito de pré-fabricação, os segmentos representam as “fatias” de geometria final do tabuleiro, que são colocadas perpendicularmente ao eixo longitudinal e por fim unidas pelo pré-esforço.

A construção por segmentos apareceu pela primeira vez em 1950 e a aplicação do conceito de pré-fabricação foi usado em França por *Eugène Freyssinet* e *Jean Muller*.

Muitas vezes ao falar-se de construção segmentar, podemos confundi-la com a construção por avanços sucessivos, pois ambas apresentam a mesma metodologia e arranjo de pré-esforço, que consiste na construção de duas consolas simétricas a partir da aduela zero em sentidos opostos de modo a vencer os vãos. A diferença reside no método de execução de aduelas que, no caso da construção segmentar são pré-fabricadas e no caso da construção por avanços sucessivos são betonadas *in-situ* [33]. Destaca-se também a semelhança dos conceitos, na medida em que a construção do tabuleiro prossegue apoiando-se nos troços já executados.

A engenharia francesa foi pioneira na execução de pontes por avanços sucessivos com a aplicação de peças pré-fabricadas.

A partir de 1960, *Jean Muller* utilizava sistematicamente elementos pré-fabricados para a construção de pontes por avanços sucessivos [13].

O princípio da execução de pontes por avanços sucessivos com aduelas pré-fabricadas consiste na colocação de aduelas uma por uma, aplicando o pré-esforço em cada uma, de modo a garantir-se uma ligação adequada, face aos requisitos impostos, Figura 2.12.

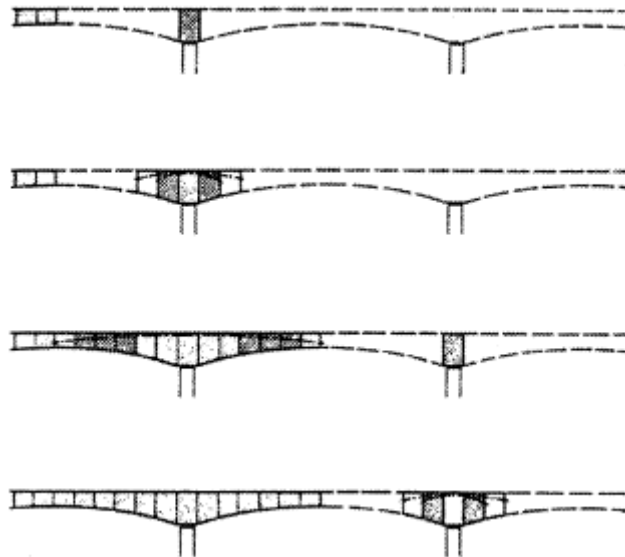


Fig. 2.12. – Esquema de execução de ponte por avanços sucessivos com aduelas pré-fabricadas [14].

Primeiras pontes construídas com esse método foram:

- Ponte sobre o rio Sena em *Choisy-le-Roi*, França, em 1962, com total comprimento de 130m (Figura 2.13.).



Fig. 2.13. - Ponte sobre o rio Sena em Choisy-le-Roi [60].

- Viaduto *d'Oleron*, França, com construção concluída em 1966, com extensão total de 2.862m (Figura 2.14.).



Fig. 2.14. - Viaduto d'Oleron, França [61].

O método construtivo foi evoluindo desde então, encontrando-se hoje cada vez mais refinado e com capacidade de abranger vários requisitos entretanto impostos pelos projetistas.

O processo construtivo de pontes por avanços sucessivos com aduelas pré-fabricadas inicia-se com a colocação da aduela 0 sobre o pilar e, de seguida, procede-se à colocação simétrica das aduelas seguintes [6]. Após a colocação de cada aduela é aplicado o pré-esforço que vai garantir a ligação monolítica à aduela anterior e assim sucessivamente até se atingir o meio vão da ponte. Para finalizar o vão, as duas consolas são unidas com a betonagem da aduela de fecho, que por sua vez une as duas consolas dando então a geometria final ao tramo da ponte.

Relativamente ao pré-esforço, este deve garantir o suporte do peso próprio de cada aduela e das restantes cargas permanentes, tendo em conta o aumento do braço e respetivo momento, à medida que a consola vai avançando. Após o fecho de duas consolas, é aplicado o pré-esforço de continuidade, adequadamente dimensionado face as cargas que a estrutura estará sujeita ao longo da sua vida útil. No caso de construção com carro de avanço, o pré-esforço é dimensionado para cada fase construtiva, em função dos esforços nas consolas, que por sua vez aumentam com o avanço do equipamento construtivo.

Para a aplicação desta metodologia construtiva recorre-se a diversos equipamentos e métodos que permitem o posicionamento e assemblagem dos segmentos pré-fabricados [6]. Na presente dissertação dar-se-á maior ênfase aos métodos mais recorrentes.

Destaca-se ainda a possibilidade da variação da altura da secção transversal do tabuleiro. O principal objetivo de utilização de secção variável é a redução do peso próprio do tabuleiro, mantendo o seu bom funcionamento estrutural. Por norma, a altura da secção transversal decresce a partir da secção dos pilares centrais e mantém a altura mínima até na secção meio vão central e extremidades do tabuleiro. Esta variação de altura, geralmente parabólica da secção transversal do tabuleiro, permite a redução da quantidade de aço de pré-esforço longitudinal, ainda que poderá gerar custo adicional durante a pré-fabricação de aduelas.

2.3.2. PRINCIPAIS MÉTODOS DE CONSTRUÇÃO

Para a execução de pontes por avanços sucessivos o primeiro desafio consiste na escolha do dispositivo de elevação de aduelas para o seu posterior posicionamento [39]. Atualmente os equipamentos mais utilizados na construção de pontes são as lançadeiras de aduelas, as gruas e os carros de elevação. De modo a escolher equipamento mais apropriado há que ter em conta vários aspetos, nomeadamente, o custo associado, a gama de pesos das aduelas, acessibilidade e tipo de terreno envolvente, capacidade de mão-de-obra, sequência de elevação entre outros.

2.3.2.1. Colocação com Recurso a Grua

A elevação de aduelas com recurso a grua em certas circunstâncias pode ser uma opção muito económica e eficaz, na medida em que a grua não apresenta um custo excessivamente elevado (nos países com maior nível de desenvolvimento) quando comparada com certos tipos de equipamentos de elevação de aduelas [6]. Contudo, os equipamentos normalmente utilizados estão muitas vezes limitados as características a que a obra os sujeita. Importa ter em atenção alguns parâmetros que poderão causar um acréscimo de custo associado, nomeadamente a capacidade de elevação, raio de alcance da lança e capacidade da grua. Conquanto, a escolha não pode passar só pelo valor monetário associado. Em terrenos muito acidentados ou com a possibilidade de aparecimento de águas pluviais, a utilização da grua pode ser impossibilitada, tendo em conta a necessidade de garantir o acesso da mesma em toda a extensão do tabuleiro para o posicionamento das aduelas. Em alguns casos, opta-se por se posicionar a grua no tabuleiro já existente, contudo, um elevado peso próprio das aduelas poderá aumentar os custos associados a aplicação desse método construtivo por implicar um longo alcance da lança da grua. Quando se opta pela utilização de gruas para o posicionamento de aduelas, uma das possibilidades de aumentar a produtividade passa por ter mais do que uma frente de trabalho. Na Figura 2.15. está apresentado o processo de colocação de aduela com recurso à grua.



Fig. 2.15. – Colocação de aduela com recurso a grua [62].

2.3.2.2. Colocação com Recurso a Lançadeira

Em geral a opção de construção com a lançadeira pode ser tomada no caso das construções em terrenos muito acidentados ou zonas urbanizadas [45]. É de notar que as lançadeiras permitem a colocação de segmentos de modo a alcançar trechos com curvaturas reduzidas e elevadas inclinações. O posicionamento das aduelas pode ser efetuado com recurso a um sistema de rolamentos presentes na lançadeira, a partir do tabuleiro já executado ou com a elevação a partir do solo ou plataformas flutuantes, no caso de construção sobre água. Frequentemente, no caso da construção de pontes e viadutos, a solução construtiva com recurso a lançadeira poderá ser conjugada com a utilização do cimbre ao solo nos encontros da estrutura. Esse método é bastante comum quando se trata de construção em zonas sensíveis, visto que o terreno do nível inferior não é afetado com os trabalhos.

Como já foi mencionado acima, o progresso na construção leva a execução de estruturas cada vez mais esbeltas e com os vãos cada vez maiores, consequentemente, as lançadeiras são muitas vezes fabricadas para uma obra específica. Tendo em conta que o valor de aquisição de uma lançadeira é normalmente relevante e que existe a necessidade de garantir mão-de-obra qualificada, torna-se importante atenuar os custos associados durante a construção. Assim, quanto maior for a dimensão e produtividade da obra a executar, mais facilmente se amortizará o investimento na lançadeira [33]. O sucesso deste método deve-se essencialmente à grande capacidade de compensar o custo inicial com a rapidez de execução, bem como a possibilidade de reutilização do equipamento em outras obras.

Por norma, as lançadeiras de aduelas trabalham em vãos de 60 aos 110 metros, no entanto se considere a aplicação mais eficiente para vãos de 90 metros. Nos casos de excelente planeamento e gestão de obra é possível montar até 16 aduelas por dia [44]. Habitualmente uma média realista situa-se no posicionamento de 4 a 6 aduelas por dia de trabalho, ainda que seja de realçar que a velocidade de montagem de aduelas é variável, por exemplo as primeiras aduelas do vão requerem maior cuidado durante o posicionamento devido ao controlo geométrico mais exigente.

O processo construtivo com recurso a lançadeira inicia-se com a colocação da mesma na posição definida. De seguida procede-se à colocação de aduelas aos pares (Figura 2.16.), de lados opostos, ou então uma a uma, dependendo da solução construtiva adotada pelo projetista. Em certos casos, consegue-se posicionar a lançadeira de modo a colocar aduela zero sobre o pilar. As aduelas são transportadas pela lançadeira para as frentes das consolas, onde é aplicada a resina epóxi, no caso de juntas com resina, e de seguida procede-se à colagem e à aplicação do pré-esforço de modo a “assemblar” um par de aduelas à restante estrutura [33]. Concluindo esse procedimento, as aduelas deixam de ser suportadas pela lançadeira passando a ser autoportantes.

O procedimento repete-se de modo a formar duas consolas que posteriormente são unidas com a aduela de fecho. No caso de construção por consolas, o maior desafio dos projetistas passa por equilibrar e vencer os momentos durante a fase construtiva, que por sua vez, são diferentes dos que a estrutura irá ser exposta ao longo da sua vida útil. Durante a fase construtiva a estrutura, sendo uma consola, está sujeita a grandes momentos negativos em cima dos apoios, que nunca mais ocorrerão durante a sua vida útil ao longo da qual estará sujeita aos momentos positivos a meio vão [27]. Uma das possibilidades de solucionar este problema passa por construir as consolas com um comprimento de aproximadamente um quinto do vão e, de seguida, fechar o vão pré-suspendendo as aduelas na posição definida, tencionando o pré-esforço longitudinal de modo a finalizar a execução do tramo.



Fig. 2.16. – Construção por avanços sucessivos com recurso a lançadeira [63].

No fim da execução de um vão completo é aplicado o pré-esforço de continuidade e procede-se à construção do vão seguinte com o avanço da lançadeira.

2.3.2.3. Içamento com Carros de Avanço

Este método construtivo tem por base a elevação das aduelas a partir da parte inferior da ponte através de guinchos, que por sua vez, serão suportados pelos carros de avanço e posteriormente ancorados ao tabuleiro já executado [44]. Tal como na construção com a lançadeira, este processo começa por se colocar a aduela 0 e as restantes aduelas por pares com a aplicação do respetivo pré-esforço. Este método construtivo pode ser auxiliado por uma grua que coloca a aduela 0 e o primeiro par de aduelas ou então as mesmas podem ser betonadas *in-situ* e, posteriormente dão apoio ao carro de avanço. Com o desenvolvimento da construção, o equipamento vai avançando para a frente de obra.

Note-se que este processo construtivo é bastante rápido e fácil na sua execução. O equipamento em si não apresenta grande peso próprio embora requeira uma mão-de-obra especializada.

Caso exista a necessidade de auxílio da grua para o posicionamento das primeiras aduelas, devem-se garantir acessos adequados para o funcionamento da mesma.

O inconveniente deste processo construtivo é semelhante a todos os outros processos de construção em consola, que passa pela alteração significativa de momentos fletores entre a fase construtiva e a vida útil da estrutura. Ainda que neste caso o efeito é agravado pela existência do carro que está sempre colocado na extremidade da consola.

Na Figura 2.17. podemos observar o equipamento descrito em funcionamento.



Fig. 2.17. - Lançamento com carros de avanço [64].

2.4. PONTES CONSTRUÍDAS COM RECURSO A TIRANTES

2.4.1. ENQUADRAMENTO

A construção de pontes com o recurso a tirantes tem uma grande gama de aplicação no que diz respeito à extensão do vão que vai de 120 a 450 metros e permite a utilização de secções transversais reduzidas [6] comparativamente com outras soluções analisadas.

O processo construtivo é caracterizado por apresentar inúmeras fases críticas, exemplo disso é a necessidade de existir um controlo constante das perdas do pré-esforço nos cabos, aquando da ocorrência de ações dinâmicas, assim como o facto de ser considerado um processo muito minucioso, na medida em que o estado de tensão dos cabos pré-esforçados depende da precisão durante a construção. Este método resulta em estruturas altamente complexas em comparação com outras soluções analisadas.

O recurso às aduelas pré-fabricadas é particularmente eficiente nos grandes vãos visto que permite amortizar o custo do investimento inicial.

2.4.2. PRINCIPAIS MÉTODOS DE CONSTRUÇÃO

2.4.2.1. Tirantes Provisórios

O método de construção de pontes com recurso a tirantes provisórios (Figura 2.18.) por ventura poderá ser combinado com a utilização dos cimbres ao solo nos encontros. No caso de combinação destas metodologias, a torre poderá ser montada no primeiro pilar de modo a dar apoio às ancoragens que irão suportar as aduelas [6].

A opção de construção com recurso a tirantes exclusivamente provisórios permite ao utilizador escolher a melhor opção para montagem da torre, que poderá ser nos encontros ou nos próprios pilares.

Este método construtivo inicia-se com a montagem da torre, de seguida as aduelas são elevadas ao nível desejado. A elevação é realizada com recurso aos equipamentos adequados, que poderão ser gruas,

guinchos etc. Após a ascensão, as aduelas são encaixadas uma a uma de ambos os lados da torre, com a posterior aplicação do pré-esforço. Caso ocorram dificuldades nos acessos para o levantamento das aduelas, as mesmas podem ser fornecidas através do tabuleiro já executado. É de referir que até ao momento de esticamento dos cabos do pré-esforço, as aduelas são suportadas exclusivamente pelo sistema de tirantes [45].

Aquando da colocação de todas as aduelas de um vão e o posterior tensionamento do pré-esforço, a torre é transportada e montada no pilar seguinte e assim consecutivamente.

A tensão nos tirantes deve ser sistematicamente controlada após a colocação de cada aduela, devido a alteração dos diagramas de esforços.

Note-se que para a aplicação deste método construtivo é necessário, para além da torre e os respetivos tirantes, possuir um equipamento adequado para o transporte da torre entre os pilares.



Fig. 2.18. – Construção com tirantes provisórios [65].

2.4.2.2. Tirantes Definitivos

A construção de pontes com tirantes definitivos (Figura 2.19.) é um dos métodos mais complexos no que diz respeito ao cálculo do processo construtivo. Este facto deve-se à necessidade de se garantir grande precisão durante a execução.

Este método construtivo inicia-se com a concretização da torre, que tem como função principal o suporte dos tirantes. De seguida, para a concretização do tabuleiro, posicionam-se as aduelas e dá-se início ao tensionamento dos cabos de pré-esforço. As aduelas são suspensas nos tirantes uma a uma de cada lado da torre [6]. Por sua vez os tirantes podem ser instalados em cada aduela, ou alternadamente.

Essa solução construtiva permite a redução da secção de betão e, consequentemente a redução do peso próprio do tabuleiro e custos associados, embora essa afirmação perca validade caso se trate de vãos com extensão reduzida [44].



Fig. 2.19. – Construção com tirantes definitivos [72].

2.5. PRINCIPAIS VANTAGENS E DESVANTAGENS DE CONSTRUÇÃO DE PONTES COM ADUELAS PRÉ-FABRICADAS

De modo a facilitar percepção de vantagens e inconvenientes da metodologia de construção de pontes com recurso a aduelas pré-fabricadas, apresenta-se abaixo em modo de resumo o Quadro 1.

Quadro 1 – Resumo de Principais Vantagens e Desvantagens de Construção de Pontes com Recurso a Aduelas Pré-Fabricadas [41].

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">▪ Menor tempo de construção, visto que as aduelas são pré-fabricadas durante o tempo de construção de fundações e pilares.▪ Possibilidade de não interrupção do tráfego na zona circundante.▪ Maior controle de produção e consequente aumento de qualidade de elementos de betão (aduelas).▪ Eficiente utilização de cofragens.▪ No caso de juntas secas a construção não depende do estado do tempo.▪ Secção do tabuleiro oca e por consequência melhor aproveitamento do betão para as cargas tipo (momentos torsores).▪ Redução do peso próprio.▪ Redução do custo de eventual reforço a longo prazo.▪ Possibilidade de reaproveitamento de materiais constituintes, bem como dos equipamentos de construção.▪ Possibilidade de ter mais que uma frente de trabalho em função do equipamento utilizado.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">▪ Custo adicional do pré-esforço e da respetiva proteção contra corrosão a longo prazo.

-
- No caso de juntas com resina epóxi, acréscimo do custo associado a aquisição e aplicação da mesma.
 - Grande variação de esforços internos entre o processo construtivo e a fase de utilização.
 - Peso próprio do equipamento construtivo e os esforços associados ao processo construtivo.
 - Métodos construtivos e tecnologias relativamente recentes (controle geométrico, comportamento das juntas, etc.).
 - Necessidade de equipa operacional qualificada para adequada execução de juntas construtivas e manuseamento dos equipamentos construtivos.
 - Necessidade de auditorias realizadas pelos engenheiros seniores com experiência na construção de viadutos segmentares.
-

3

PARTICULARIDADES DE CONSTRUÇÃO DE PONTES COM ADUELAS PRÉ-FABRICADAS

3.1. INICIAÇÃO DE CONSTRUÇÃO

O planeamento e decisões tomadas no início de um projeto podem determinar o seguimento dos trabalhos. Varias decisões preliminares relacionadas com a localização e instalação do estaleiro para um projeto de uma ponte de aduelas pré-fabricadas devem ser tomadas durante o processo de concurso. Um ou vários potenciais locais de armazenamento devem ser examinados analisando a necessidade de preparação do terreno, o equipamento necessário, os acessos ao local e a limpeza do terreno no final do projeto.

Após a adjudicação do projeto, as decisões preliminares devem ser expandidas para assegurar um suave e eficiente início. Este processo irá realçar várias situações que tendem a ser esquecidas antes da chegada da primeira aduela ao local de colocação. Como acontece na maioria dos projetos de construção, o tempo é um fator primordial, isto significa que, imediatamente após a adjudicação, vários itens devem ser solicitados. Uma das principais ideias de planeamento de construção de pontes com aduelas pré-fabricadas passa por ter as aduelas prontas na zona de armazenamento para colocação assim que solicitadas pelo equipamento de elevação.

O item mais importante são as aduelas, que podem levar de 12 semanas a 6 meses a serem entregues [18], dependendo do número de moldes necessários e da complexidade geométrica das aduelas. É neste momento que o local de armazenamento deve estar pronto para receber as mesmas assim que finalizadas.

Outro item que requer considerações prévias é a mão-de-obra necessária para o projeto. Os projetistas são normalmente conhecidos no início de um projeto. Contudo, a equipa de apoio demora algum tempo até estar totalmente composta, e incluirá inspetores, encarregados, equipa de cofragem, equipa de armadores de aço, equipa de pós-tensão e injeção, operadores e vários outros auxiliares necessários para o trabalho diário.

O espaço necessário para a área de armazenamento deve ter em conta vários fatores, como por exemplo, o comprimento e altura das aduelas, a capacidade da grua a utilizar, o espaço entre as aduelas armazenadas e o posicionamento de equipas de trabalho. No caso de aduelas serem empilhadas – os lotes necessários e a zona da área de transporte. Pressupostos relativos a necessidades de espaço devem ser considerados e todas as suposições devem ser claramente expostas durante a preparação da proposta. O estaleiro deve ter uma certa flexibilidade sem afetar a fluidez dos trabalhos e a eficiência da produção.

Visto que a preparação do estaleiro é geralmente um ponto crítico no percurso de todos os projetos, as características da propriedade, como a localização, distância à obra, dimensões e capacidade, são informações necessárias antes de finalizar qualquer negociação. Uma cuidada avaliação das características existentes e a antecipação das necessidades do estaleiro são necessárias para um acerto inicial dos custos de preparação e do impacto nos prazos a cumprir.

Alguns projetos de pontes de aduelas pré-fabricadas são realizados em águas profundas. Nestes casos, a construção do estaleiro com acesso à grua para entrega através de barças é uma grande vantagem [18]. É importante saber as dimensões e peso das aduelas e as necessidades de entrega das mesmas em obra, para assim se poder avaliar o tamanho necessário e o número de barças a utilizar.

3.2. MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE ADUELAS

Dentro da tecnologia de pré-fabricação de aduelas existem dois principais tipos de produção: o método de linha longa de fabrico e o método de linha curta.

Para as pontes construídas com as aduelas pré-fabricadas a precisão da geometria de aduelas é de extrema importância. Durante todo processo de fabrico deve manter-se um rigoroso controlo geométrico de modo a ajustar geometria real à definida teoricamente. Caso exista algum desvio, procede-se imediatamente aos ajustes necessários de modo a respeitar os requisitos impostos.

Para garantir adaptabilidade das aduelas durante a montagem do tabuleiro em obra recorre-se frequentemente a uma curva do fabrico durante a produção que auxiliará o controlo da geometria final do tabuleiro. A curva de fabrico é realizada através de duas componentes fundamentais: o perfil geométrico necessário, que se traduz na definição da curvatura horizontal e vertical do tabuleiro, bem como da sua sobrelevação; e a compensação dos desvios de fabrico e deformações a longo prazo.

3.2.1. MÉTODO DE LINHA LONGA

O método de linha longa consiste na fabricação de todas as aduelas de um vão, caso se trate da construção vão a vão, ou de uma ou duas consolas, no caso de construção por avanços, com a movimentação da cofragem ao longo da linha de fabrico. Quando a pré-fabricação é feita por duas consolas simultaneamente, a aduela zero é betonada juntamente com as restantes.

Geralmente as cofragens externas laterais utilizadas neste método mantêm-se fixas ao longo da betonagem, com o comprimento igual ao do carro de avanço e a profundidade correspondente à altura máxima da aduela a executar. As cofragens inferiores devem ser ajustadas à altura da aduela a betonar, enquanto as centrais e a divisória frontal, que delimita o comprimento de aduela a betonar, são adaptadas para o caso da profundidade ser variável. Note-se que é possível a execução de aduelas para o perfil longitudinal do traçado da ponte em curva constante devido à possibilidade de ajuste da cofragem. A geometria dos desviadores, bem como dos maciços de ancoragem estão previstos na cofragem interior das aduelas. Todas as partes de cofragem mencionadas acima devem possuir equipamentos que permitam deslocação ao longo do tramo a betonar e possibilitam os ajustes necessários de modo a garantir geometria de aduelas prevista no projeto.

Caso se proceda à betonagem de duas consolas simétricas em simultâneo, a cofragem é composta por dois moldes movidos com recurso a rolamentos dos lados opostos relativamente à aduela do pilar.

A resistência do solo de fundação deve ser devidamente avaliada, visto que poderá causar grandes complicações no que toca ao assentamento da estrutura e, por consequência, alteração da geometria prevista no projeto.

O método de linha longa de fabrico foi o primeiro a ser utilizado para a fabricação de aduelas, visto que oferece uma grande vantagem no que toca ao controlo geométrico, que é facilmente alcançado com os ajustes das cofragens constituintes (Figura 3.2.).

Contudo, esse método apresenta alguns inconvenientes como, por exemplo, dificuldade de execução de grande variedade de formas geométricas, as cofragens são dificilmente reutilizáveis de um projeto para outro, a necessidade de ocupação de um espaço substancialmente grande (Figura 3.1.) (no mínimo o comprimento é geralmente um pouco maior do que metade da extensão mais longa da estrutura, mas depende sobretudo da geometria e da simetria estrutural).

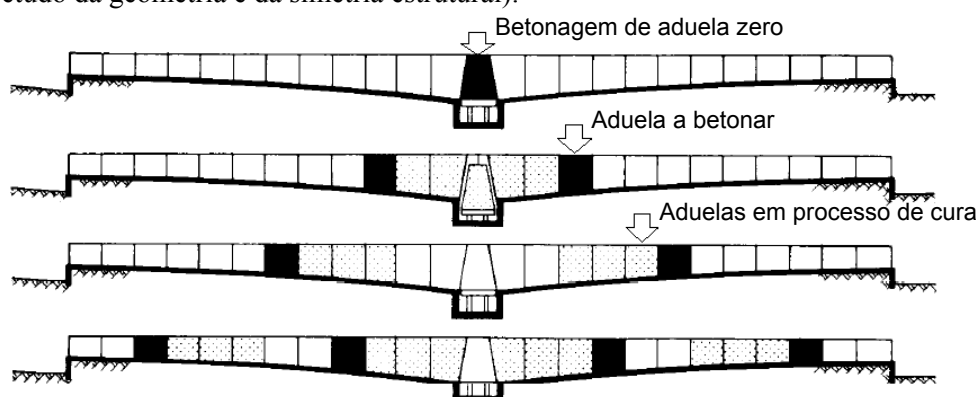


Fig. 3.1. – Representação esquemática do método de linha longa de fabrico [39].

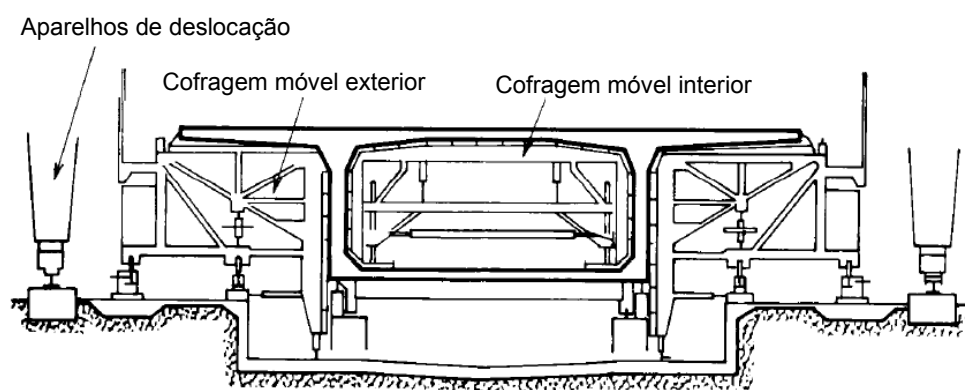


Fig. 3.2. - Seção transversal tipo do método de linha longa de fabrico [39].

3.2.2. MÉTODO DE LINHA CURTA

Através do método de linha curta de fabrico a cofragem não se desloca, sendo as aduelas que se movem da posição de moldagem para a posição de união e de seguida para o seu armazenamento (Figura 3.3.).

Este método apresenta várias vantagens, como por exemplo espaço necessário mais reduzido em comparação com o método de linha longa. Todo o processo de fabrico está centralizado e o sistema é facilmente adaptável às variações geométricas das curvas verticais, horizontais e transições de elevação

sem grande aumento do custo associado. A aplicação do método de fabricação de linha curta permite concretização de tabuleiros com inclinações transversais de 6% a 10% e raios até 45 m [33]. As cofragens também poderão ser reutilizadas para outros projetos (Figura 3.4.).

A desvantagem deste sistema é que o ponto de união das aduelas tem de ser executado com grande precisão, tendo em conta a inexistência de margem para tolerância de grandes falhas na união.

O método de linha curta consiste na junção de betão fresco de uma nova aduela contra o betão já endurecido da aduela anterior. Um separador de união é aplicado na superfície da aduela já betonada para assegurar que as aduelas se separem facilmente. A técnica da linha curta é vastamente utilizada na pré-fabricação de aduelas, visto que as mesmas se separam de forma correta e, após elevação, se unem corretamente formando uma junta praticamente invisível.

As precauções a ter em conta são apenas o cuidado na aplicação do separador de união e a necessidade de evitar perturbações que possam provocar danos físicos na junta.

Para um correto ajuste no momento de montagem de aduela em obra, as faces das juntas não devem ser alteradas, exceto por um leve jato de areia. Isto geralmente significa que nenhum trabalho pode ser realizado nas faces das juntas e as aduelas não podem ser esforçadas de modo a evitar deformações diferenciais.

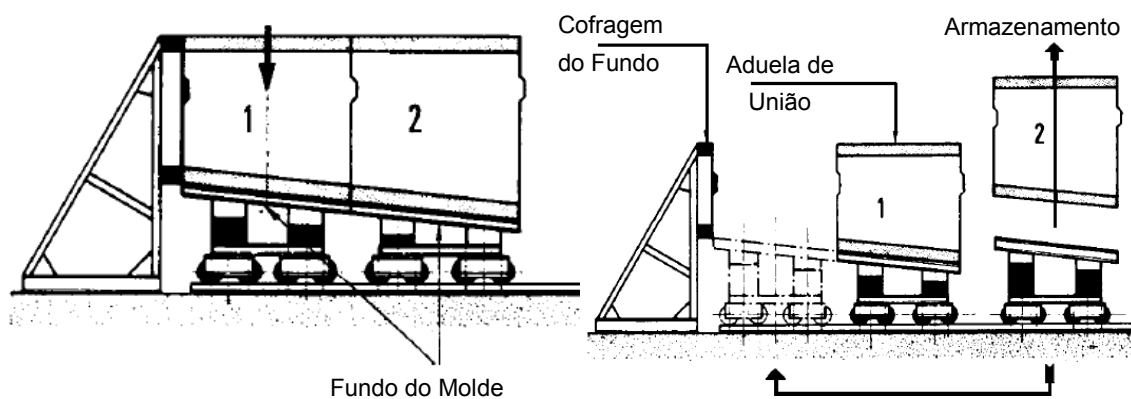


Fig. 3.3. - Representação esquemática do método de linha curta de fabrico [39].

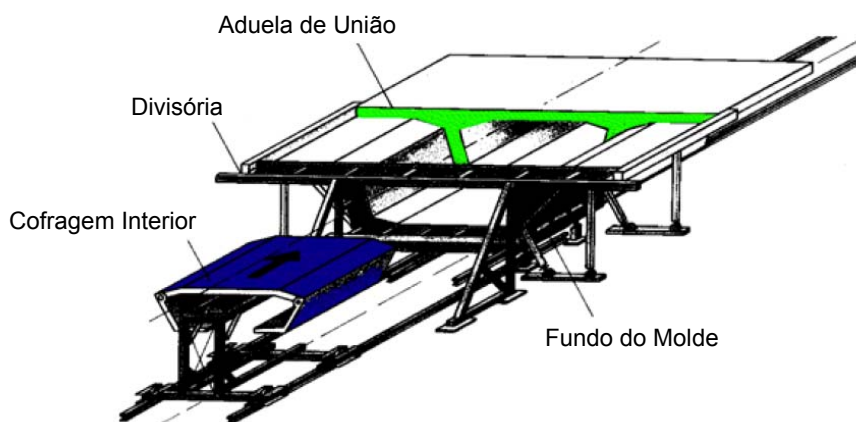


Fig. 3.4. - Cofragem tipo do método de linha curta [39].

3.3. ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE DE ADUELAS

Após a fabricação das aduelas, estas são armazenadas até atingirem a resistência necessária para que possam ser transportadas não causando danos irreversíveis na sua geometria. O armazenamento é feito sobre três pontos de apoio em cada aduela para que, caso ocorra um assentamento diferencial nos apoios, o movimento associado se traduza no movimento de um corpo rígido, sem induzir esforços na própria aduela (Figura 3.5.). Dois dos pontos de apoio são as extremidades de uma das almas e o terceiro ponto situa-se no meio da outra. Esta solução permite a reduzir possibilidade, caso algum dos pontos ceda, de provocar torção na aduela. Tendo em conta que, por norma, existe um limite de espaço para o armazenamento poder-se-á optar por empilhar as aduelas umas em cima das outras, em duas (Figura 3.6.) ou três camadas, sendo necessário realizar uma verificação da resistência das aduelas, da estabilidade do terreno e dos apoios.

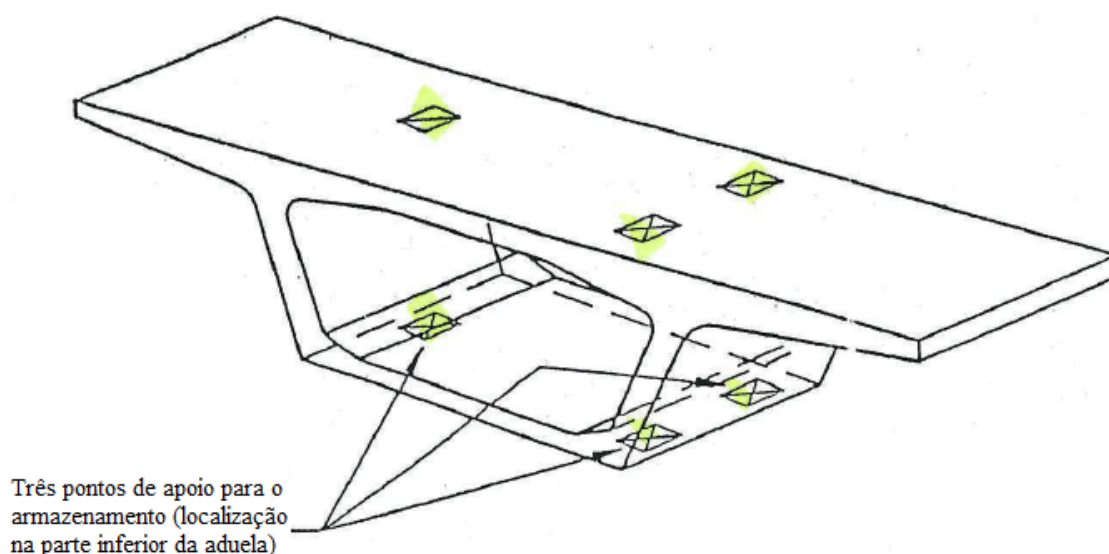


Fig. 3.5. – Representação esquemática de pontos de apoio para o armazenamento de aduelas [18].

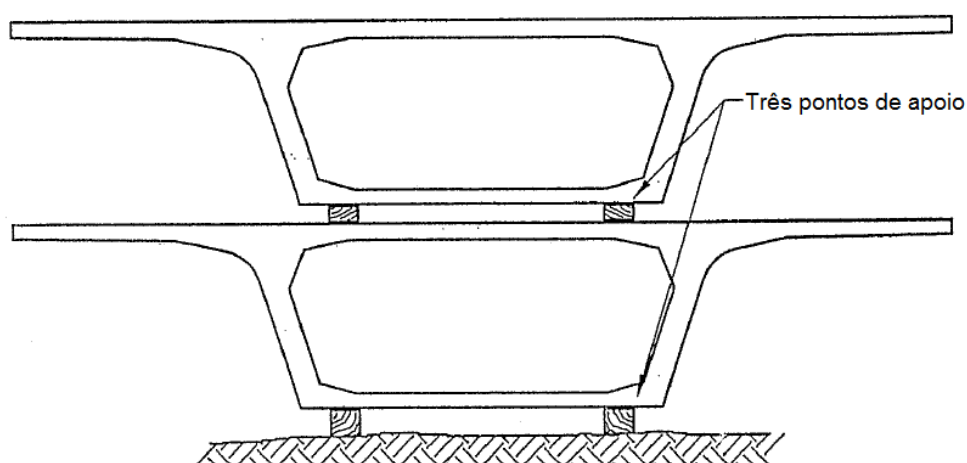


Fig. 3.6. – Representação esquemática do armazenamento de aduelas em duas camadas [18].

O transporte das aduelas poderá ser feito através de vários meios como, por exemplo camião, barco, comboio ou meios de transporte específicos (pórticos sobre pneumáticos). A escolha será feita em função da distância e condições do local de pré-fabricação ou de armazenamento à obra. No caso de aduelas serem transportadas através de uma estrada pública, existe normalmente uma limitação de comprimento de 3 a 6 m de modo a minimizar perturbação do tráfego [18].

Para o manuseamento das aduelas são utilizadas gruas ou plataformas de elevação especiais que permitem a sua colocação ou recolha do transporte empregue, cuja operação pode ser realizada várias vezes entre o seu local de fabrico e a sua posição final, bem como do armazenamento onde as aduelas se podem encontrar durante vários meses até à sua utilização.

São utilizados dispositivos no banzo superior das aduelas para possibilitar o seu levantamento. Instala-se uma argola de aço na malha da armadura para que assim, um gancho de elevação possa ser usado quando necessário. Também se poderá optar por deixar pequenos furos no banzo superior para colocação de suportes de elevação removíveis.

Para tabuleiros construídos através das lançadeiras, as aduelas são geralmente entregues ao longo da construção do tabuleiro com o posicionamento do transporte debaixo do vão a executar ou fornecidas pela retaguarda do tabuleiro já executado.

Caso não haja possibilidade de acesso ao ponto de elevação com um transportador rodoviário, poderá utilizar-se um transportador que se desloque sobre carris ou “lagartas” para mover as aduelas por baixo do tabuleiro à posição de colocação. Este é um processo mais lento para o levantamento das aduelas e é geralmente limitado a projetos de difícil acesso.

As barças poderão ser utilizadas para entregas de aduelas caso seja necessária a travessia de rios. A sua aplicação em conjunto com gruas ou através de plataformas de elevação permite o transporte de várias aduelas de uma só vez.

3.4. CONTROLO GEOMÉTRICO DE ADUELAS

O controlo geométrico é considerado uma das partes essenciais do processo de monitorização da construção que, por sua vez, garante um perfil longitudinal e transversal requerido. Para além disso é uma ferramenta essencial para a verificação das tensões instaladas nas juntas e no pré-esforço que permite atender às expectativas do projeto.

O controlo geométrico de uma estrutura de aduelas pré-fabricadas começa no estaleiro. O sistema de fabrico de linha curta baseia-se em realizar pequenos ajustes em cada aduela de união na cofragem com uma maior precisão do que o sistema de “linha-longa” onde o controlo geométrico é principalmente alcançado quando montado o eixo intradorso.

A precisão do controlo geométrico da linha curta de fabricação não está relacionado com o tamanho, variações de espessura ou tolerância das componentes das aduelas, embora tenham importância na melhoria da qualidade geral de acabamento do produto. A medida crítica passa pela precisão do posicionamento de aduela betonada anteriormente em relação à união a realizar.

3.4.1. CURVA DE FABRICO

De modo a assegurar que o perfil da ponte a curto e a longo prazo coincida com o perfil projetado, é necessário definir e acompanhar uma curva de fabrico adequada às exigências e, ao longo do processo de execução de aduelas, atender aos ajustes, caso existam.

A geometria da curva de fabrico deve ser acompanhada na célula betonagem no caso de linha curta de pré-fabricação, ou na cama de betonagem no caso de linha longa. De modo a obter um perfil coincidente com o alinhamento teórico da superestrutura da ponte é necessário considerar na geometria da estrutura final os desvios ao longo do tempo derivados da fluência e retração. Por sua vez, o conceito de contra flecha estrutural deve estar presente durante a elaboração das curvas de fabrico. Este conceito consiste no desvio que deve-se considerar entre o traçado da superestrutura na fase de betonagem e o alinhamento teórico final da mesma (Figura 3.7.), de modo a compensar as deformações causadas pelas cargas, solicitações diferidas no tempo e o comportamento do pré-esforço, incluindo a contabilização das várias etapas construtivas e os seus efeitos. Para garantir um rigoroso desenvolvimento de curvas de fabrico recorre-se por norma aos métodos computacionais que permitem incluir toda a informação necessária no processo de pré-fabricação nomeadamente, o plano de contra flechas, as curvas verticais e horizontais do perfil e possíveis erros na betonagem dos vários segmentos.

Para elaboração de uma curva de fabrico adequada é essencial atender a certos fatores fundamentais:

- As cargas aplicadas: permanentes, construtivas e do pré-esforço;
- As características de matérias: fluência, retração e módulo de elasticidade do betão; módulo de elasticidade dos cabos do pré-esforço, incluindo efeitos não lineares;
- A sequência do processo construtivo.

Caso algum desses fatores divirja da hipótese considerada no cálculo, deve avançar-se para o desenvolvimento de uma nova curva.

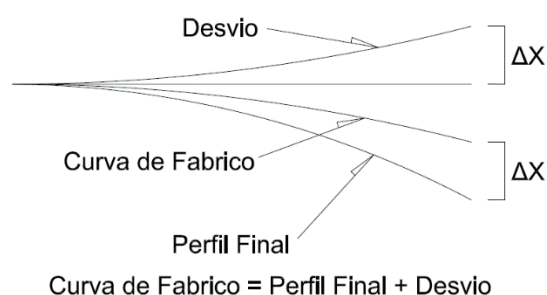


Fig. 3.7. – Definição tipo da curva de fabrico.

A produção das aduelas não deve começar sem que as curvas de fabrico estejam desenvolvidas, o que por sua vez exige um conhecimento do método construtivo que irá ser aplicado, das características dos materiais e das cargas que a estrutura estará sujeita. Por vezes existe a necessidade de proceder a ensaios que permitam controlar as características do betão e do aço durante a fabricação. É aconselhável monitorizar sistematicamente os pesos próprios dos materiais constituintes, bem como das aduelas após a fabricação. No Capítulo 4 o assunto de variação do peso próprio previsto, assim como a sua influência nas tensões instaladas em interfaces será abordado com maior detalhe.

A qualidade das curvas de fabrico, bem como de toda a metodologia de pré-fabricação irá determinar a facilidade de posicionamento das aduelas e naturalmente, ditará a durabilidade e eficiência estrutural da ponte.

3.4.2. CONTROLO GEOMÉTRICO DURANTE A PRÉ-FABRICAÇÃO

O “*know-how*” e experiência dos operadores do processo de fabrico de aduelas é um dos fatores fundamentais no sucesso de projetos de construção de obras de arte com recurso a elementos pré-fabricados. Como já foi referido anteriormente, toda a produção deve respeitar a geometria estrutural definida pela curva de fabrico de modo a conseguir-se uma definição final correta após montagem *in-situ*. No que concerne à pré-fabricação através do método linha longa de fabrico (a mesa de betonagem reproduz o perfil da estrutura com o respetivo plano de contra flechas), devido à sua menor complexidade no que diz respeito a esta matéria, não será desenvolvido neste trabalho.

- Controlo geométrico durante a pré-fabricação com o método linha curta de fabrico

Tendo em conta o facto da margem de correção durante a instalação das aduelas ser muito reduzida e as ações corretivas serem de difícil implementação, deve-se ter um especial cuidado na definição e controlo geométrico dos segmentos durante a sua fabricação. A exigência dos níveis de precisão durante o processo de fabricação de aduelas é bastante rigorosa, visto que deve-se assegurar o cumprimento das tolerâncias geométricas da estrutura.

No caso da produção de aduelas ser feita através da linha curta de fabrico, com a betonagem de cada aduela contra a anterior impondo-se deste modo uma orientação relativa na última, consegue-se materializar os alinhamentos curvos do tabuleiro tanto em planta como no perfil.

O controlo da geometria das aduelas consegue-se topograficamente, processando-se a informação relativa do processo de fabricação mediante um programa computacional que, por sua vez e considerando os dados do traçado teórico da ponte e da geometria das aduelas pré-fabricadas anteriormente, determina geometria a impor na aduela a betonar, assegurando que o tabuleiro fabricado se aproxime o mais possível do traçado teórico. Atualmente existem vários *softwares* comerciais de controlo geométrico para a fabricação de aduelas, no entanto o seu uso encontra-se normalmente restrito a consultores especializados.

De seguida apresentam-se os principais passos integrantes do processo de controlo geométrico das várias aduelas [25] [44] [45]:

Antes de dar início à betonagem é fundamental estabelecer algumas coordenadas necessárias no sistema de produção. As coordenadas dos pontos de dimensionamento (tipicamente são 6 pontos de referência (Figura 3.8.)) na aduela contramolde [n-1] e na aduela a betonar [n], são pré-calculadas e gravadas na memória do sistema, com recurso a um programa computacional apropriado. O posicionamento da aduela [n-1] é então definido pela torre de controlo mais próxima, emitindo os respetivos ajustes que os macacos hidráulicos instalados na base da aduela [n-1] terão de realizar. Essa orientação é observada no mínimo por duas estações de controlo, de modo a evitar erros e para ir verificando a atual precisão dos instrumentos. Todas as medições efetuam-se na parte superior das aduelas, através dos pontos de referência (Figura 3.8.). O controlo geométrico no parque de pré-fabricação tem duas partes distintas: o controlo geométrico em planta e o controlo em alçado. O primeiro deve proceder ao controlo em alçado, tendo em consideração que os movimentos em alçado produzem variações em planta e que os movimentos em planta não variam as cotas dos pontos de controlo em alçado.

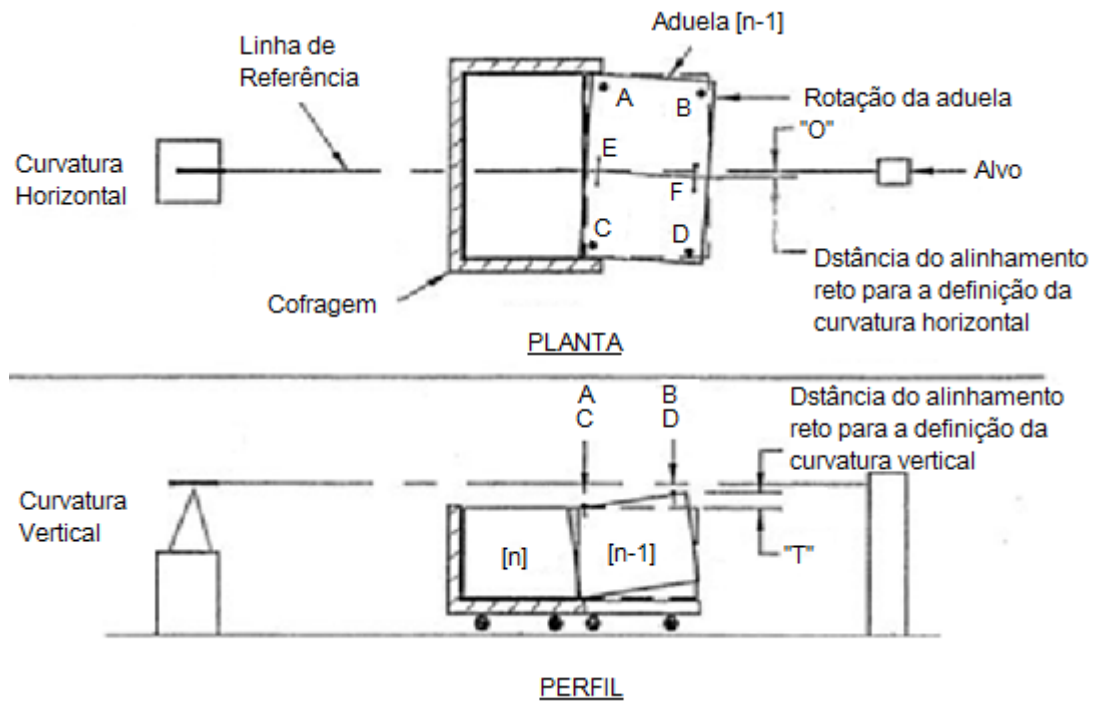


Fig. 3.8. - Esquematização do processo de controlo geométrico na fabricação de aduelas pelo método de linha curta [18].

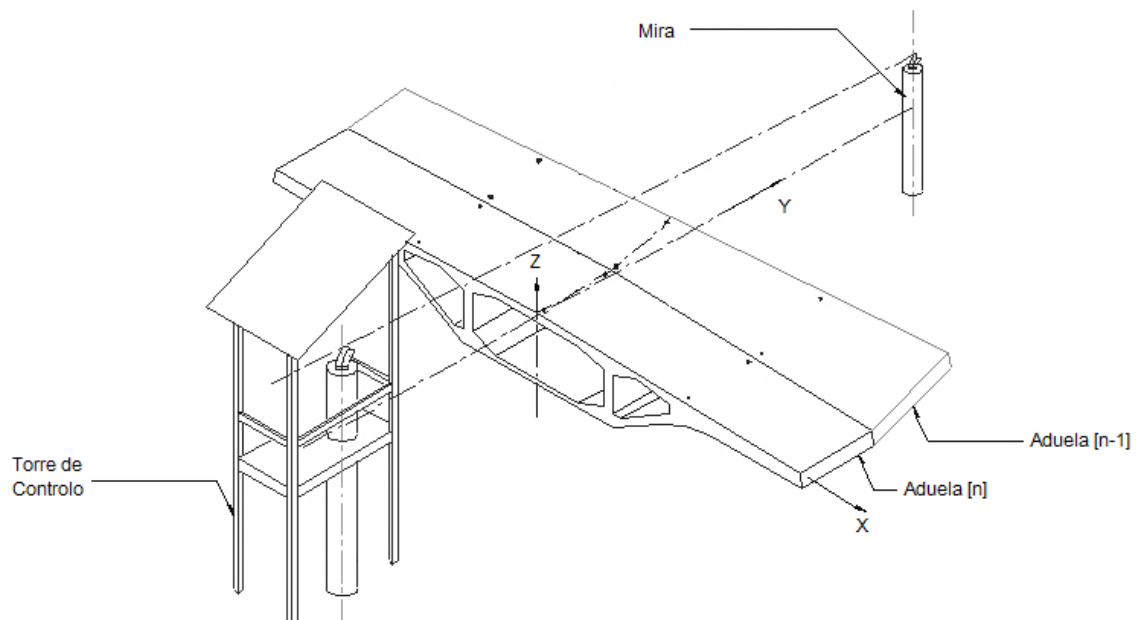


Fig. 3.9. - Esquematização do processo de controlo geométrico na fabricação de aduelas pelo método de linha curta [18].

Todo o processo de controlo geométrico pode ser resumido nos seguintes passos [25]:

- Cálculo das coordenadas teóricas de betonagem do segmento [n-1];

- Medição das atuais coordenadas de betonagem;
- Cálculo do erro do processo de betonagem do segmento [n-1];
- Cálculo da correção a ser efetuada na betonagem do segmento [n] que tem como contramolde o segmento [n-1];
- Ajuste do segmento [n-1] de modo a proceder a compensação de erro, no processo de betonagem do segmento [n].

Ao longo do processo de pré-fabricação existe grande possibilidade de ocorrência de desvios na geometria de aduelas comparativamente à geometria estabelecida no projeto. Estes desvios podem ser originados pelos vários fatores como por exemplo, devido a um erro de alinhamento do encaixe entre as aduelas ou a tensões secundárias derivadas das ações térmicas (gradientes térmicos entre as duas aduelas devido à variação da temperatura ambiente durante o processo de cura do betão) que podem descoordenar o alinhamento. Caso os erros não sejam corrigidos durante o processo de fabrico, podem surgir problemas durante a montagem de aduelas *in-situ* e, neste caso, a correção será muito mais complexa e dispendiosa [25]. Ressalta de novo a importância de cumprimento da curva de fabrico durante a betonagem de aduelas, visto que permite a correção constante dos desvios ao longo da fabricação, garantindo deste modo um correto perfil do tabuleiro após a montagem em obra.

Contudo os pequenos erros durante a fabricação são praticamente inevitáveis, no entanto existem margens a cumprir para o sucesso do projeto. A existência de erros de $\pm 2\text{mm}$ não acarretará em princípio qualquer problema para a geometria final, sendo assim crucial que a precisão do controlo ao longo de todo o processo seja da mesma ordem [48]. É aconselhável recolher leituras em paralelo ainda que separadamente, pelo empreiteiro e pessoal competente, a fim de evitar interpretações erradas. É provável que dois conjuntos de leituras não estejam em acordo mas as leituras paralelas e consequente tratamento computacional dos dados irá definir geometria e evitar erros grosseiros [18]. Periodicamente, o alinhamento das células de linha central e a elevação da cofragem devem ser verificados para os pontos de referência de modo a evitar erros involuntários derivados dos movimentos do equipamento durante a sua utilização.

O processamento das observações é feito tanto por análise numérica como por tratamento gráfico. O primeiro é tratado por computador ou calculadora para, que assim que o procedimento esteja estabelecido, se torne repetitivo e automático.

Estão disponíveis programas computacionais específicos para lidar com este tipo de cálculo, ainda que não garantam não ocorrência de erros. Daí ressalta a necessidade de verificar os resultados realizando estimativas paralelas.

No que diz respeito aos tipos de equipamentos de controlo geométrico geralmente utilizados destaca-se a torre de controlo no local de fabricação de aduelas (Figura 3.9.). Esta poderá ser uma estrutura simples e de fácil construção, no entanto deverá ser vertical e horizontalmente estável e possuir uma altura suficiente para avistar todos os pontos de controlo.

Com o atual desenvolvimento de automatizações, todo o processo de pré-fabricação e de controlo geométrico pode ser automatizado através do uso de medições a laser, tratamento computacional automático de erros geométricos e de um mecanismo de aplicação dos movimentos de ajuste (Figura 3.10.).

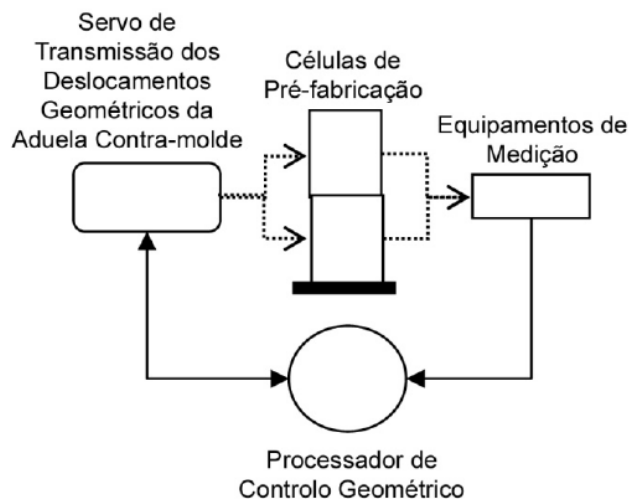


Fig. 3.10. – Esquemática do processo de controlo geométrico [25].

Concluindo, compreensão detalhada de todo o processo de controlo geométrico na linha de produção é de extrema importância para assegurar um resultado final bem-sucedido. A existência do sentimento de receio relativamente a erros no processo de fabricação, com o aumento dos custos associados, poderá ser saudável na medida em que influenciará a entidade produtora das aduelas a ser mais metódica, detalhada e efetuar um controlo mais rigoroso. A compreensão e revisão dos programas computacionais, a monitorização e manutenção do dispositivo de controlo serão também fatores determinantes no sucesso da operação [45].

3.4.3. CONTROLO GEOMÉTRICO DURANTE A MONTAGEM DAS ADUELAS

Após a conclusão do processo de fabricação das aduelas é crucial que toda a informação das operações de betonagem e os cálculos associados à posição relativa das aduelas sirvam de referência ao longo do processo de levantamento durante a montagem das aduelas.

No entanto, existem algumas dificuldades práticas visto que não é tão fácil obter a mesma precisão em campo como no estaleiro. Se bem que, o rigor do controlo geométrico em campo tem maior impacto durante a colocação da aduela zero, que por sua vez serve de orientação para colocação das aduelas seguintes. Note-se que não é fácil colocar uma grande peça de betão com recurso a um equipamento de elevação com a precisão de alguns milímetros. Na prática, é possível usar “calços” ou “cunhas” para manobrar as aduelas com uma precisão aceitável. Durante a fabricação o ajuste horizontal da aduela zero pode ser definido através da instalação de marcadores transversais suplementares de alinhamento na cofragem a betonar, já no campo existe a possibilidade de utilização de uma linha de base da largura total da aduela. Deste modo o posicionamento não depende apenas do limite central longitudinal.

Durante o processo de montagem das aduelas os alinhamentos verticais e horizontais devem ser constantemente verificados de modo a averiguar conformidade com os cálculos de pré-fabricação, caso contrário será necessário efetuar ajustes e compensações. Tais ajustes incluem reorientação ou rotação dos apoios após elevação, calculando uma definição compensatória para os subsequentes suportes ou “calços” das juntas. Estes últimos devem ser usados apenas como último recurso, visto que podem imprevisivelmente levar a correções mal sucedidas.

É essencial garantir precisão nos sistemas de controlo geométrico de modo a evitar erros na geometria da estrutura. Uma possível fonte de erros no alinhamento pode surgir das características de deformação do betão serem diferentes das assumidas. As deformações no betão são de difícil previsão e a maioria das tentativas são feitas com base nas avaliações obtidas. Durante a construção de pontes com recurso a aduelas, a deformação pode variar, assim como durante a pré-fabricação. A maioria das deformações devido à retração do betão ocorram durante o armazenamento, o que permite eliminar variações significativas do betão mais fresco.

Durante a montagem das aduelas é essencial efetuar um ajuste preciso e uma verificação muito cuidada da primeira aduela a ser posicionada uma vez que, qualquer erro na sua posição é ampliado proporcionalmente à razão entre o comprimento desta e o comprimento do tabuleiro.

Após a colocação e verificação da aduela zero, o alinhamento horizontal e vertical das aduelas seguintes deve ser igualmente verificado. Na prática, procede-se ao cálculo e medição do alinhamento após a elevação de 4 ou 6 aduelas [18]. Os alinhamentos devem corresponder à geometria definida teoricamente. Os únicos erros a ocorrer devem ser ligeiros desvios derivados dos erros e correções de produção. A linha global de posicionamento deve estar próxima da linha requerida no projeto.

O alinhamento deve ser próximo do alinhamento pretendido no momento da sua elevação, quando devidamente corrigido para ter em conta os efeitos mencionados. É difícil ter uma imagem precisa da tolerância necessária a beneficiar, visto que a mesma depende do tipo de construção.

Qualquer tipo de variação substancial do alinhamento e nivelamento ou qualquer tendência comportamental fora das previsões, notada no início da construção, deve ser sujeita a um estudo pormenorizado com posterior tomada das medidas corretivas. Essas medidas, especialmente de correção de erros sistemáticos, que alteram as curvas de posicionamento para próximas aduelas, podem passar por enchimentos de fibra de vidro de modo a garantir o ajuste do alinhamento. Esta solução deve ser usada apenas como ultimo recurso, uma vez que provoca concentração de tensões nos “calços” e um deficiente fecho das juntas. Importa referir ainda que os sistemas de ajuste geométrico com cilindros hidráulicos podem ser uma solução vantajosa no que diz respeito ao controlo geométrico durante a montagem das aduelas.

É crucial ter plena noção das implicações de realização de desvios sistemáticos em cada operação de união, erros nos resultados do tratamento computacional ou algum defeito físico do equipamento. A Figura 3.11. apresenta o efeito total criado pela realização repetida de desvios sistemáticos. O desvio final pode ser traduzido pela Equação 1 [18]:

$$E = \frac{[n] \times [n - 1] \times e}{2} \approx \frac{n^2 \times e}{2} \quad (1)$$

Onde:

$[n]$: aduela a posicionar;

$[n - 1]$: aduela precedente a aduela a posicionar;

e : desvio no posicionamento de aduela $[n]$;

E : desvio total.

Por outras palavras, um desvio sistemático de, por exemplo, 0.06cm em cada aduela irá elevar-se para um desvio de 3cm após a colocação de 10 aduelas e 12cm após a colocação de 20. Deste modo, torna-

se evidente que os desvios sistemáticos devem ser evitados e existe grande necessidade de técnicas preventivas.

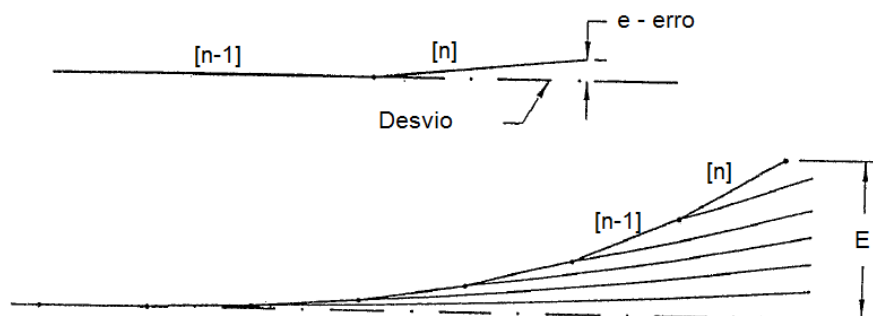


Fig. 3.11. – Efeito de acumulação de erros sistemáticos [18].

3.5. CARACTERÍSTICAS DAS JUNTAS ENTRE ADUELAS PRÉ-FABRICADAS

As juntas entre as aduelas pré-fabricadas geralmente possuem chaves de corte que podem ser preenchidas com uma fina camada de resina epóxi para transmitir tensões normais e de corte ao longo dos vãos. As primeiras pontes de aduelas pré-fabricadas tinham uma única chave em cada alma da aduela para se obter a mesma posição relativa entre as aduelas na estrutura após o transporte e colocação. Esta chave também foi usada para transferir as tensões de corte através da junta.

A Figura 3.12. resume o sistema de forças em relação a uma aduela tipo durante a sua montagem na estrutura em consola. Para a montagem de uma nova aduela contra a anterior, por norma aplica-se o pré-esforço longitudinal na parte superior ou por vezes inferior da aduela, que se traduz no esforço representado por F , que por sua vez é somatório de F_1 e F_2 . A força aplicada pelo pré-esforço suporta o peso da aduela (W), que com a atuação de F transforma-se nas reações R_1 e R_2 . A componente vertical do R pode ser equilibrada apenas pela face inclinada da chave, enquanto o equilíbrio da componente normal R_2 causa distribuição longitudinal de compressão. Na estrutura final todas as tensões de compressão e de corte são transmitidas através das juntas.

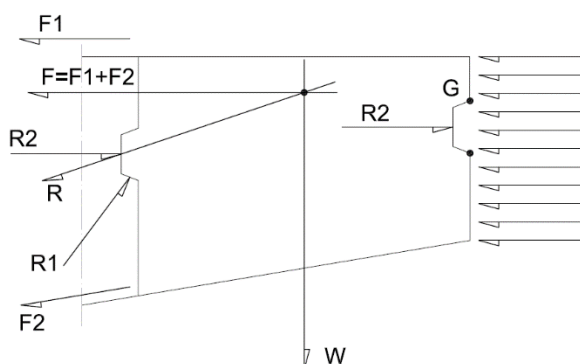


Fig. 3.12. – Forças atuantes numa aduela tipo durante a montagem.

3.5.1. MÉTODOS DE CÁLCULO DE JUNTAS

O comportamento das juntas entre aduelas é de extrema importância para a segurança de uma estrutura segmentar. Na Figura 3.18. podemos analisar grande diferença nas tensões de corte e de compressão para o dimensionamento segundo os três regulamentos mais utilizados.

A capacidade resistente de uma junta com chaves baseia-se na combinação de atrito entre as superfícies de deslizamento e a capacidade de corte das chaves.

3.5.1.1. Modelos de Calculo

Várias pontes segmentares foram projetadas de acordo com as recomendações de AASHTO.

A Equação 2 é baseada principalmente nos ensaios com pequenas amostras que, por norma, possuem apenas uma chave de corte análoga a apresentada na Figura 3.13.

AASHTO (1998):

$$V_j = A_k \times \sqrt{6,792 \times 10^{-3} \times f_{ck}} \times (12 + 2,466 \times \sigma_n) + 0,6 \times A_{sm} \times \sigma_n \quad (2)$$

[MN]

Onde:

σ_n : compressão média na junta [MN];

A_k : área mínima de todas as chaves no plano de rotura [m²];

f_{ck} : valor característico de compressão do betão aos 28 dias [MPa];

A_{sm} : área entre chaves no plano de rotura [m²].

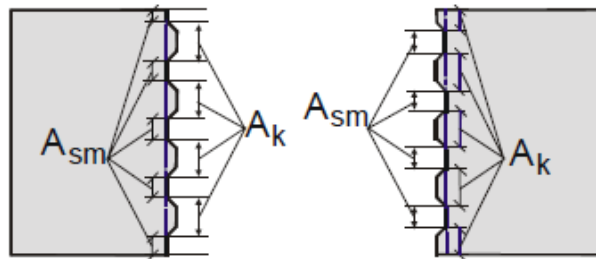


Fig. 3.13. – Representação esquemática das áreas da Equação 2 [41].

De acordo com as recomendações alemãs para o dimensionamento de pontes segmentares, devem ser consideradas somente as forças de atrito sem qualquer acréscimo de resistência devido a configuração das chaves. Esse facto é representado pela Equação 3. Neste caso a área efetiva de atrito passa a ser A_T .

Segundo Regulamento Alemão [DBV (1998)]:

$$V_j = \mu \times \sigma_n \times A_T \text{ [MN], com } \mu = 0,7 \quad (3)$$

Onde:

A_T : área efetiva de atrito [m²] (Figura 3.14.);

μ : coeficiente de atrito.

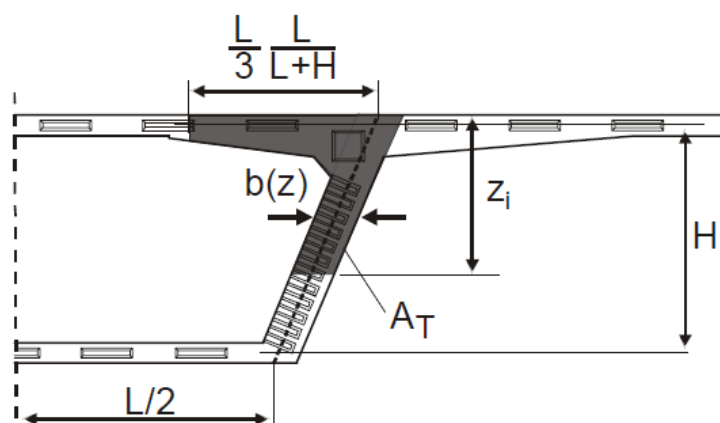


Fig. 3.14. – Representação de área efetiva de atrito segundo regulamento Alemão [41].

3.5.1.2. Ensaios e Verificação Numérica

Com objetivo de clarificar o comportamento das juntas entre aduelas apresenta-se um estudo efetuado pelo *Rombach et al* [41]. De modo a desenvolver um modelo de cálculo para os ensaios de amostras com uma ou várias chaves nas juntas (Figura 3.15.), recorreu-se ao método de elementos finitos com a modelação dos provetes. No estudo foram consideradas as juntas secas e juntas com aplicação da resina epóxi. As dimensões e a configuração das chaves teve em conta o modelo utilizado na construção corrente de pontes de aduelas. Para o cálculo de resistência ao corte, no modelo numérico, contabilizou-se a não-linearidade do material, a resistência por atrito e o contributo da configuração geométrica das chaves.

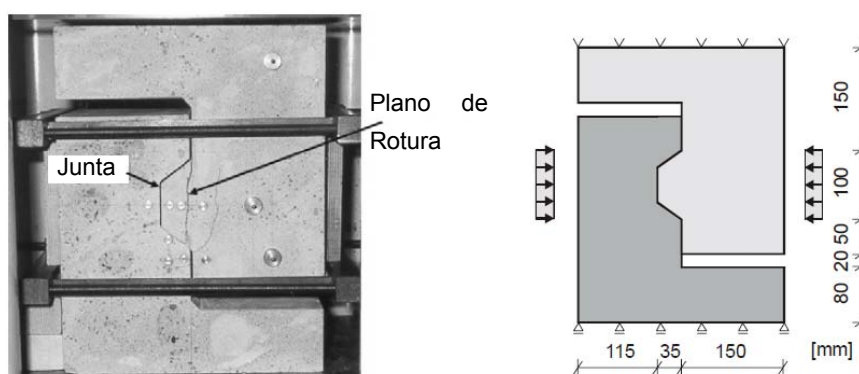


Fig. 3.15. – Representação do provete e de modelo de cálculo [41].

Inicialmente os provetes foram submetidos ao esforço normal em relação à junta e, de seguida, carregados com uma força vertical aplicada na parte superior da junta.

Na Figura 3.16. apresenta a curva de carga-deformação obtida dos resultados de ensaios, bem como proveniente da análise do modelo numérico. Após a comparação dos resultados podemos concluir que em ambos os casos o comportamento mecânico da junta, calculado analiticamente foi bastante próximo do obtido no ensaio. No entanto, como o comportamento do betão é extremamente complexo quando se aproxima da carga de rotura, esse não foi modelado analiticamente, posto que esta fase não se considera relevante para a capacidade de carga da junta.

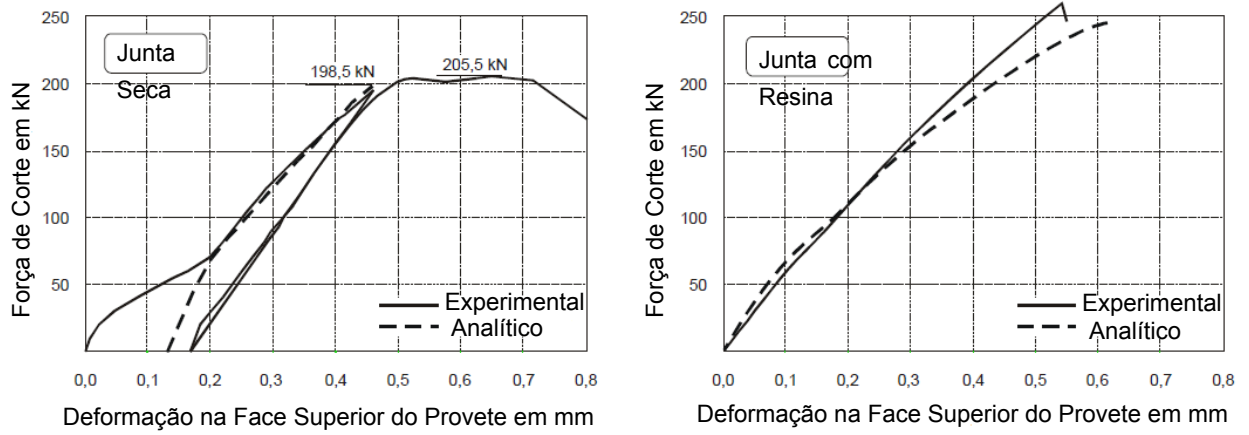


Fig. 3.16. – Curvas carga-deformação [41].

3.5.1.3. Modelo de Dimensionamento Proposto por Rombach

Após a validação do modelo de elementos finitos, executou-se uma análise numérica de várias configurações de chaves de corte para diferentes tipos de betão, que conduziu a um modelo de cálculo diferente dos existentes. A capacidade resistente de uma junta seca com chaves ($V_{d,j}$) traduz-se por uma capacidade resistente por atrito e por corte. Em primeiro lugar, a área em compressão é A_{junta} e não apenas uma fração da mesma como recomendada AASHTO. Em segundo lugar, a capacidade de suporte de carga para as chaves depende da resistência do betão à compressão e a respetiva carga de compressão aplicada no plano da junta A_{chave} . A fórmula para a obtenção de capacidade resistente de junta segue na equação abaixo:

Juntas secas:

$$V_{d,j} = \frac{1}{\gamma_F} \times (\mu \times \sigma_n \times A_{junta} + f \times f_{ck} \times A_{chave}) \text{ [MN]} \quad (4)$$

Onde:

$\mu = 0,65$: coeficiente de atrito;

$\gamma_F = 2,0$: coeficiente de segurança;

σ_n : compressão média na zona da junta [MN];

$A_{junta} = h \times b$: área da junta em compressão (Figura 3.17.);

b : largura da alma;

h : altura da alma;

$f = 0,14$: fator para a indentação da articulação;

f_{ck} : valor de característico a compressão do betão aos 28 dias;

A_{chave} : área mínima de todas as chaves no plano de rotura;

$$A_{chave} = \min \sum h_{ne} \times b_n; \min \sum h_{ne} = \sum h_{ne,1-3}^r < \sum h_{ne,1-4}^l \quad (4.1)$$

h_{ne} : altura das chaves (Figura 3.17.), com $h_{ne} \leq 6 \times b_n$ ($h_{ne,i}^r$ – face a direita; $h_{ne,i}^l$ – face a esquerda);

b_n : largura das chaves.

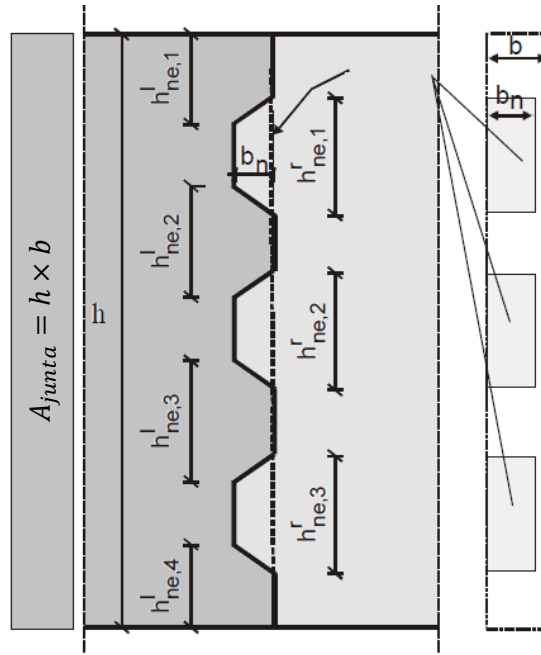


Fig. 3.17. – Representação das áreas de cálculo [41].

O plano de falha A_{chave} tem a menor área de rotura de chaves. A expressão aplica um coeficiente de segurança relativamente elevado de $\gamma_F = 2,0$, visto que se trata de um modo de rotura frágil. Para o cálculo de resistência nas juntas coladas considera-se apenas o contributo de resistência por atrito (Equação 5). As experiências vieram demonstrar que o incremento de resistência devido a aplicação de resina nas juntas é relativamente pequeno. Uma junta com resina apresenta uma resistência superior em cerca de 20% em comparação com uma junta seca.

Juntas coladas:

$$V_{d,j} = \frac{1}{\gamma_F} \times \mu \times \sigma_n \times A_{junta} \text{ [MN]} \quad (5)$$

De modo a comparar os resultados obtidos aplicando os modelos de cálculo descritos acima, apresenta-se o gráfico com o desenvolvimento de tensão de corte calculado para uma aduela tipo segundo os três modelos (Figura 3.18.). No caso concreto, o valor característico à compressão do betão aos 28 dias é de $f_{ck} = 40\text{MPa}$.

Tensão de corte:

$$\tau = V_{d,j} / A_{junta} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

$$\text{(AASHTO):} \quad \tau = 4,17 + 1,06 \times \sigma_n \text{ [MPa]} \quad (6.1)$$

$$\text{(DBV):} \quad \tau = 0,7 \times \sigma_n \text{ [MPa]} \quad (6.2)$$

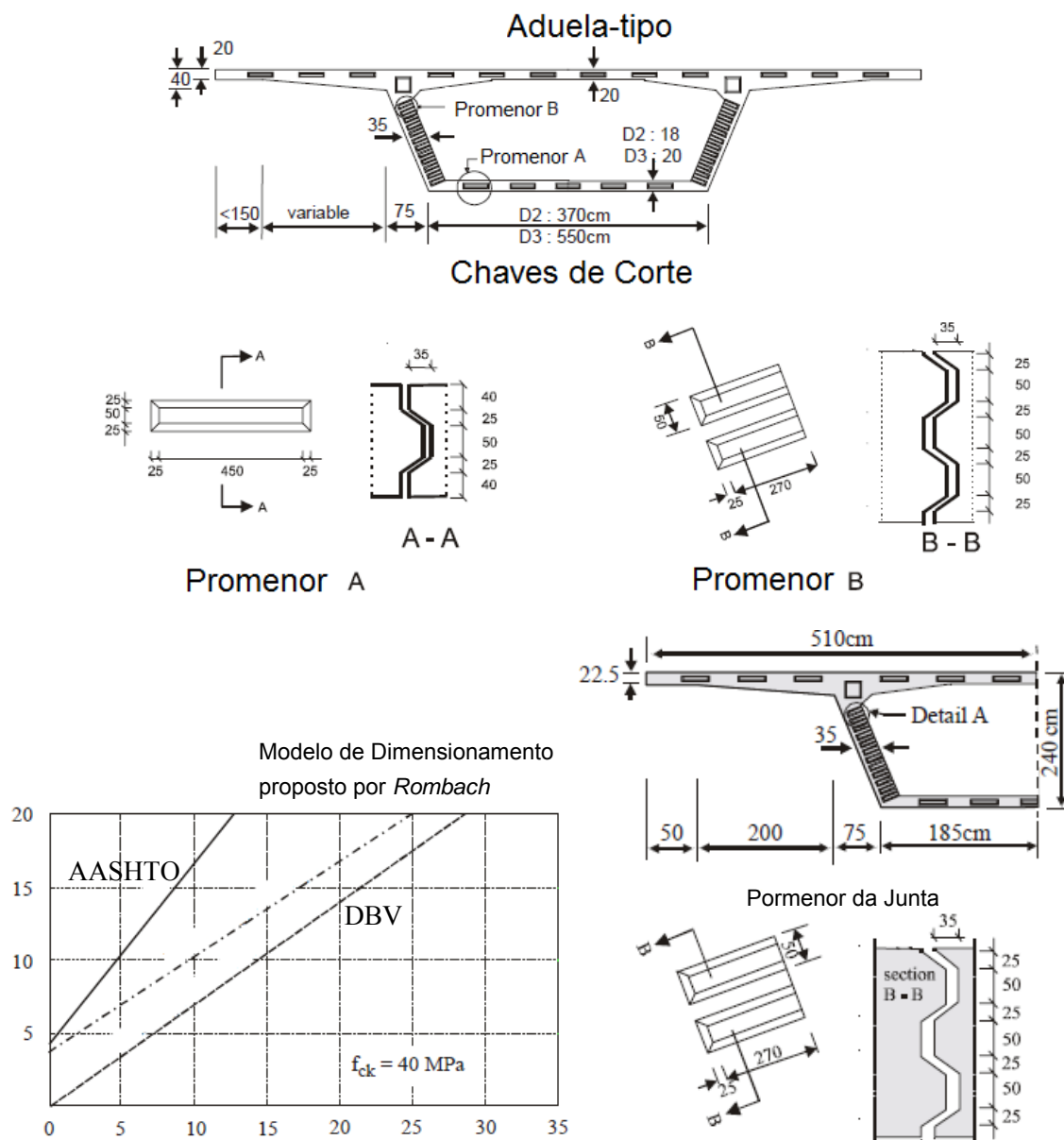


Fig. 3.18. – Comparação entre diferentes modelos de cálculo para uma aduela-tipo [41].

Com a configuração geométrica de uma aduela-tipo apresentada na Figura 3.18., destacam-se grandes diferenças entre os resultados obtidos segundo a norma AASHTO (1998) e a norma Alemã [DBV (1998)], ainda que ambos os modelos adotem uma relação linear entre a capacidade resistente da junta e a tensão de compressão.

O modelo segundo a norma AASHTO não deverá ser utilizado para elevadas forças de compressão, que podem advir do dimensionamento para o estado limite último. Além disso, esta norma parece sobrestimar a capacidade resistente de corte da junta [41].

3.5.2. TIPOS DE JUNTAS

Entre diversos tipos de juntas entre aduelas pré-fabricadas podemos destacar cinco principais (Figura 3.19.):

- Juntas em betão com espessuras de 20 a 60 cm;
- Juntas com argamassa com espessuras de 7 a 12 cm;
- Juntas com calda de cimento com espessuras de 2 a 5 cm;
- Juntas com resina epóxi ou argamassa de cimento com espessuras inferiores a 3 mm;
- Juntas secas.

Cada uma das juntas acima indicadas apresenta certas particularidades e campos de aplicação. Por exemplo: as juntas em betão ou argamassa são mais utilizadas em construções de tabuleiros em consola, visto serem mais rígidas; as juntas com calda de cimento são indicadas no caso de necessidade de garantir a quebra de rigidez entre aduelas (possibilidade de localização de rótulas plásticas). Já as juntas com resina epóxi e juntas secas são mais apropriadas para a construção tramo a tramo (menores esforços nas juntas durante o processo construtivo).

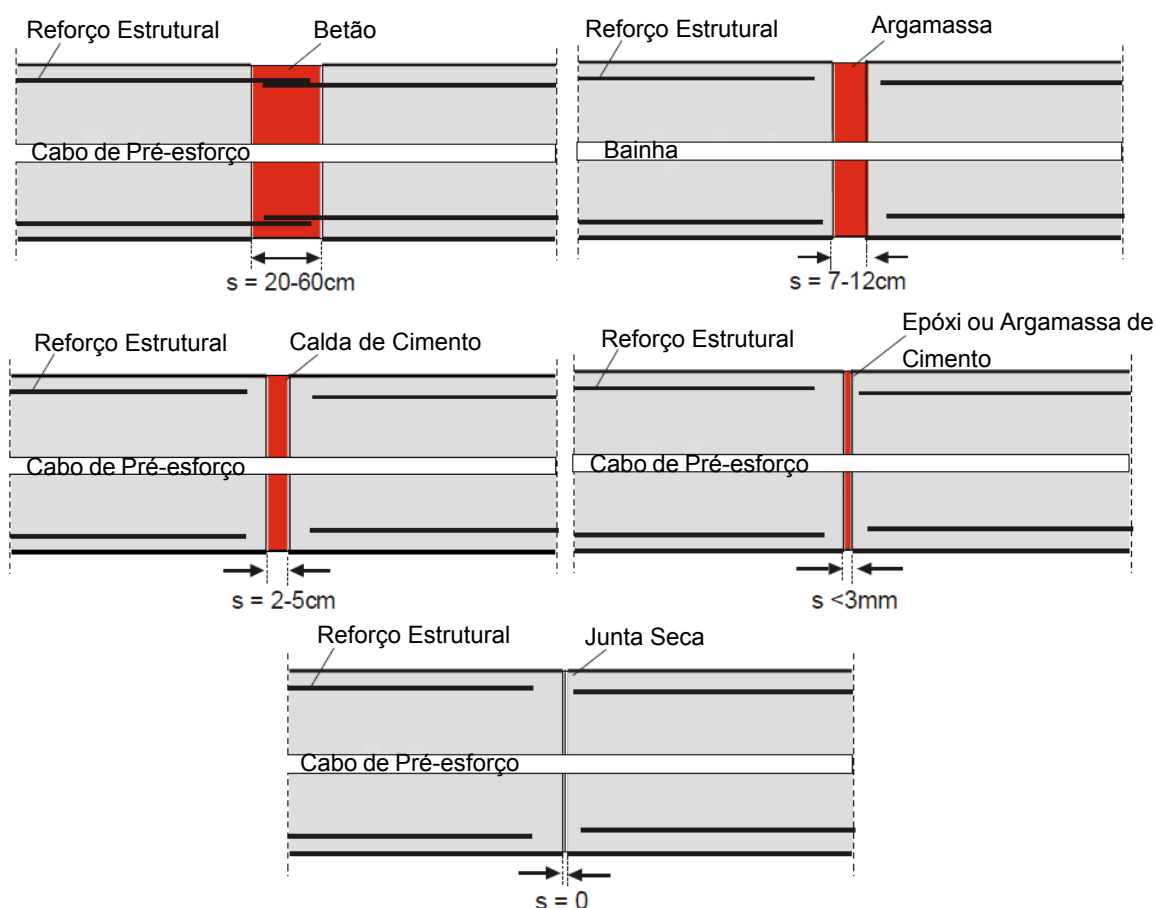


Fig. 3.19. – Tipos de juntas mais comuns [41].

3.6. DIMENSIONAMENTO LONGITUDINAL

O projeto de uma ponte de aduelas pré-fabricadas deve corresponder a uma série de requisitos impostos pelos regulamentos em vigor, aplicados em cada país onde a obra irá ser concebida. Contudo existe uma série de exigências que são aplicadas independentemente da localização de obra, como por exemplo a operacionalidade e garantia de resistência ao estado limite último e de utilização.

3.6.1. ESTADO LIMITE DE UTILIZAÇÃO

As verificações do comportamento corrente da estrutura durante a sua vida útil, e tendo em conta as cargas que estará sujeita, são elaboradas para os estados limites de utilização/serviço (ELS). O principal objetivo da verificação face aos ELS é a adaptabilidade estrutural às ações e a durabilidade. Por norma os ELS condicionam a quantidade do pré-esforço necessário a aplicar na construção.

No caso de pontes construídas com aduelas pré-fabricadas existe a necessidade de limitação das tensões normais de modo a evitar aberturas nas juntas entre aduelas, que por sua vez obriga ao cumprimento de critérios mais limitativos comparativamente com pontes betonadas *in-situ*.

Após a pesquisa bibliográfica conclui-se que os limites para os valores de compressão nas juntas variam ligeiramente, por exemplo “*em condições de serviço a compressão da superestrutura com juntas secas deverá ser no mínimo de 1 MPa*” [41] ou então “*as juntas deverão apresentar uma tensão residual de compressão entre 0.5 MPa a 1.5 MPa, sob ação das ações permanentes, pré-esforço a tempo “infinito”, cargas variáveis e gradientes térmicos*” [30].

A grande questão que poderá surgir é o modo como se procede a transferência de esforços entre as aduelas. No entanto, no caso de existência de chaves nas ligações entre aduelas, esta transferência está facilitada, visto que à partida, todo o perímetro da junta estará em compressão e contribui na transferência dos esforços de corte.

Por último, no dimensionamento da armadura passiva longitudinal, há que ter em conta o efeito da torção e a necessidade de atenuar os esforços gerados pela retração e fluência a longo prazo. Isto é necessário porque os fenómenos associados à retração e fluência a curto prazo apresentam-se bastante diminutos, considerando o facto de aduelas possuírem alguma idade quando posicionadas, o que, por sua vez, se traduz na melhoria de qualidade da geometria e diminuição de redistribuição de esforços.

Quanto aos regulamentos aplicados para o dimensionamento face ao ELS de pontes com aduelas pré-fabricadas (limitação de tensões):

- ENV 1992, ENV 1992-1-3 e ENV 1992-1-5:
 - No estado limite de serviço o Eurocódigo não permite a descompressão das juntas não armadas para as combinações frequentes;
 - Para o caso de cabos de pré-esforço exterior a parte 1-5 particulariza a não descompressão para a combinação de ações característica.
- AASHTO (1998):
 - Impõe o uso de juntas com chaves múltiplas em toda a altura das almas das aduelas;
 - Necessidade de dispor chaves na laje superior e inferior, podendo tratar-se apenas um único elemento e de maiores dimensões para posicionamento relativo;
 - Fornece procedimento tipo para o cálculo da dimensão das chaves;
 - Para cargas de serviço recomenda valores de tensão de compressão no betão e nas juntas de 0,7 MPa para juntas secas e estado limite de descompressão para juntas com epóxi.

3.6.2. ESTADO LIMITE ÚLTIMO

No cálculo para ELU, a ponte construída com aduelas pré-fabricadas perde drasticamente a sua rigidez e por consequência resulta uma flecha considerável. As juntas entre as aduelas sofrem grande concentração de tensões e, por sua vez tendem a desenvolver fissuração. Devido à considerável importância da abertura das juntas, geralmente pode-se considerar que todas as deformações se concentram na localização de rótulas plásticas e que as restantes aduelas se comportam rigidamente.

Em ELU resultam esforços significativos, essencialmente no caso de juntas situadas em cima dos apoios e a meio vão (localização frequente de rótulas plásticas).

A deformação da estrutura é diretamente proporcional a distribuição de esforços aplicados. Por exemplo, normalmente a meio vão os valores do momento fletor que provocam a abertura das juntas são bastante semelhantes, e o esforço transversal praticamente nulo, no entanto na proximidade dos apoios a ação de momento fletor é conjugada com um grande esforço de corte. Este fenómeno poderá explicar o facto de rápida variação do momento fletor e da seguinte junta se encontrar tipicamente fechada.

Importa referir que as secções transversais sofrem grandes esforços de compressão na parte superior das aduelas a meio vão e na parte inferior junto aos apoios que estão relacionados com a rotação do tabuleiro. Dito isso, as aduelas localizadas nas partes críticas do tabuleiro devem apresentar uma ductilidade bastante elevada de modo a evitar o fenómeno de esmagamento do betão. De modo a aumentar a ductilidade, é comum aplicar os reforços adequados aos esforços calculados para o ELU visto tratar-se de zonas que possam sofrer rotura frágil.

Após a abertura das juntas entre aduelas a transmissão dos esforços de corte ficará bastante complexa. Por norma, recomenda-se considerar apenas a área transversal comprimida para o efeito de transferência dos mesmos.

Nesse contexto, em estado limite último, a zona comprimida nas secções com juntas abertas, tem que permanecer comprimida em pelo menos dois terços da sua altura total em secções com momentos negativos e, pelo menos um terço da sua altura a meio vão. No ENV 1992-1-5 recomenda-se que todas as juntas permaneçam comprimidas em dois terços da sua altura total.

É aconselhável a colocação de armadura transversal de suspensão nas aduelas, dimensionada segundo o método de escoras e tirantes, para transmissão dos esforços de corte.

Concluindo, a limitação da altura da zona comprimida nas juntas controla indiretamente a abertura das mesmas. Com a aplicação desta medida acrescenta-se a segurança na resistência ao corte em ELU. Porém, esta recomendação poderá alterar o comportamento estrutural visto que com a imposição de capacidade de rotação das aduelas diminui-se a possibilidade de formação de rótulas plásticas e, naturalmente, impede-se a ocorrência de distribuição de esforços em estruturas hiperestáticas.

Regulamento aplicado para o dimensionamento face ao ELU de pontes com aduelas pré-fabricadas:

- ENV 1992-1-5:
 - Para o dimensionamento aplicam-se as normas de betão armado convencional e, tanto os esforços sobre as juntas, como a ação do pré-esforço exterior serão considerados como forças exteriores atuantes sobre a estrutura;
 - As juntas não armadas deverão satisfazer as condições aplicáveis para a transferência de esforços. A transmissão apenas se considerará ocorrer na área comprimida da junta. A transmissão da força de corte através da junta deverá ser considerada como força exterior atuante sobre a aduela;
 - Deverá ser dada atenção à rápida diminuição da profundidade da zona comprimida no caso de incremento do momento fletor atuante. Considerando que para a ação mais

desfavorável, as juntas sem armaduras deverão estar comprimidas em pelo menos dois terços da sua altura total.

3.6.3. METODOLOGIAS DE ANÁLISE

3.6.3.1. Análise Elástica

A metodologia de análise elástica das pontes e viadutos pode ser aplicada para os ELS. Este facto deve-se ao tipo de comportamento estrutural, tendo em consideração que a estrutura se encontra em compressão e, por sua vez assume comportamento elástico.

Importa referir a possibilidade de aplicação do método de análise elástica para a verificação de segurança em ELU, se bem que essa possibilidade é limitada para a análise local e apenas em soluções com o pré-esforço interior e aderente. Nestes casos existe um maior controlo de abertura das juntas e, mesmo após a fissuração, gera-se um incremento de tensão adicional nos cabos que permite a aplicação da análise elástica para os ELU.

Todavia numa superestrutura com pré-esforço exterior uma análise elástica não é de todo uma solução suficiente.

3.6.3.2. Análise Plástica

O método de análise plástica traduz-se na avaliação de vários cenários de aparecimento de rótulas plásticas com a posterior avaliação do comportamento estrutural.

Em estruturas com o pré-esforço exterior, as deformações não são transmitidas diretamente aos cabos, gerando somente um incremento das extensões entre pontos fixos. Estes incrementos de tensões nos cabos apresentam grande complexidade de quantificação. A distribuição dos esforços na estrutura depende em grande parte das deformações globais. As alterações provocam variação de tensão nos cabos que não pode ser analisada secção a secção.

No caso de um vão simplesmente apoiado o processo começa pela consideração de uma rótula plástica formada em zona de maior momento fletor. Após o cálculo da capacidade rotacional da secção em causa e o cálculo da flecha, procede-se a estimativa da extensão nos cabos de pré-esforço.

Resumindo, com recurso ao método de análise plástica é possível estimar os incrementos de tensão nos cabos de pré-esforço.

3.6.3.3. Análise não Linear com Modelação por Elementos Finitos

Tendo em conta o facto do comportamento altamente não linear dos materiais em fase de pré-rotura [41], o mesmo não poderá ser avaliado com os métodos convencionais de análise linear.

A solução poderá passar pela utilização de programas de cálculo que permitem análise não linear e modelação com recurso a elementos finitos (Figuras 3.20., 3.21., 3.22.). Atualmente os programas de cálculo computacional oferecem possibilidade de obter os resultados considerando a existência dos cabos de pré-esforço e permitem consequentemente determinar com rigor a capacidade de rotação das juntas.

Refere-se também a importância do método com modelação por elementos finitos para análise localizada onde se preveem grandes concentrações de tensões, como por exemplo nos diafragmas e nas juntas com chaves (Figuras 3.20., 3.23.). Ainda que, nunca poderá ser dispensado um modelo teórico

simples para a validação dos resultados obtidos ou para calibração das propriedades físicas no programa de cálculo.



Fig. 3.20. – Modelação de aduela com chaves por elementos finitos [41].

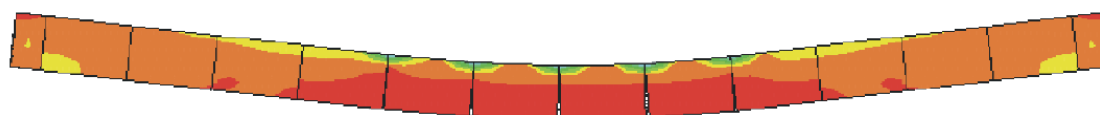


Fig. 3.21. – Modelação do tabuleiro por elementos finitos com representação da abertura das juntas [41].

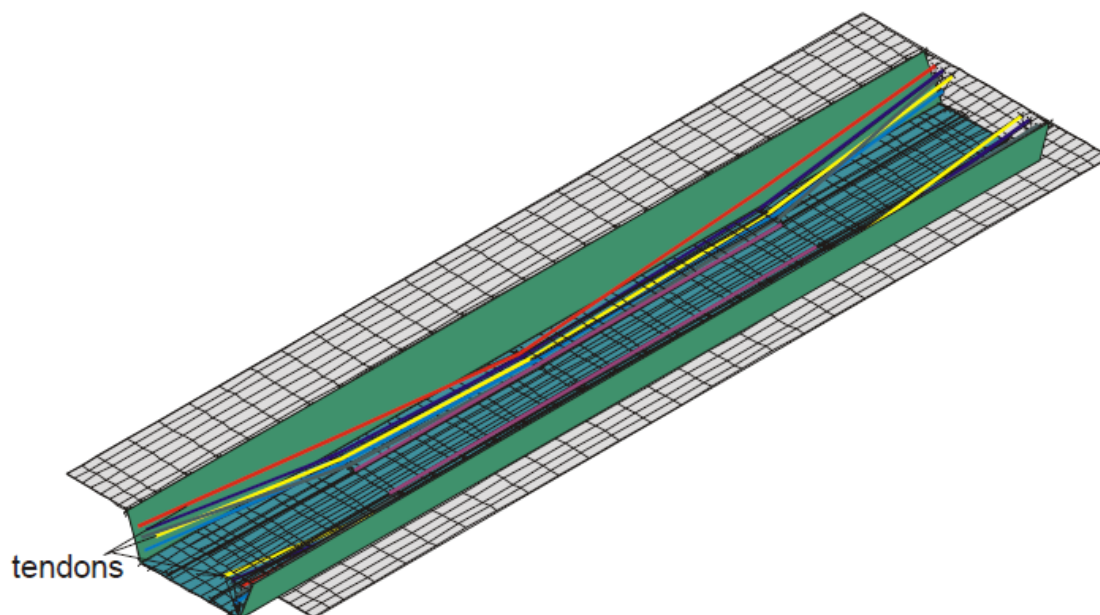


Fig. 3.22. – Modelação do tabuleiro e cabos de pré-esforço por elementos finitos [41].

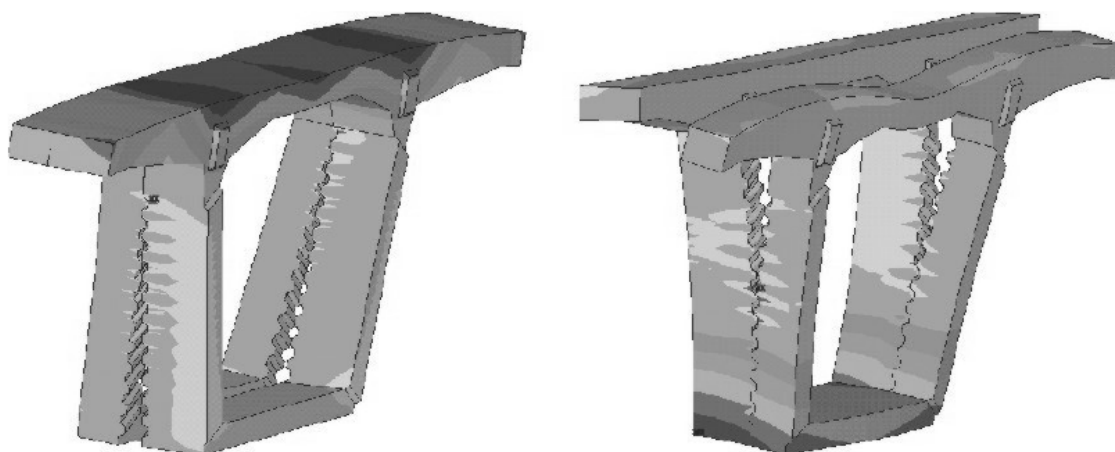


Fig. 3.23. – Representação da abertura de juntas [41].

De modo a exemplificar o comportamento estrutural quando modelado com método de elementos finitos, apresentam-se os pontos fulcrais de investigações numéricas num tramo simplesmente apoiado com juntas secas, que foi elaborado no âmbito do projeto da *"Second Stage Expressway System"* em Banguecoque [41].

Nas Figuras 3.24. e 3.25. é possível observar as dimensões da estrutura bem como o traçado dos cabos. Note-se o facto de estrutura ser real (construída em 1990), permitindo assim validar os resultados da análise numérica. O vão em análise é de aproximadamente 45 m, composto por 14 aduelas, 12 das quais com espessura de 3,4 m, e 2 com aproximadamente 1,7 m, solução de juntas secas e aplicação do pré-esforço exterior.

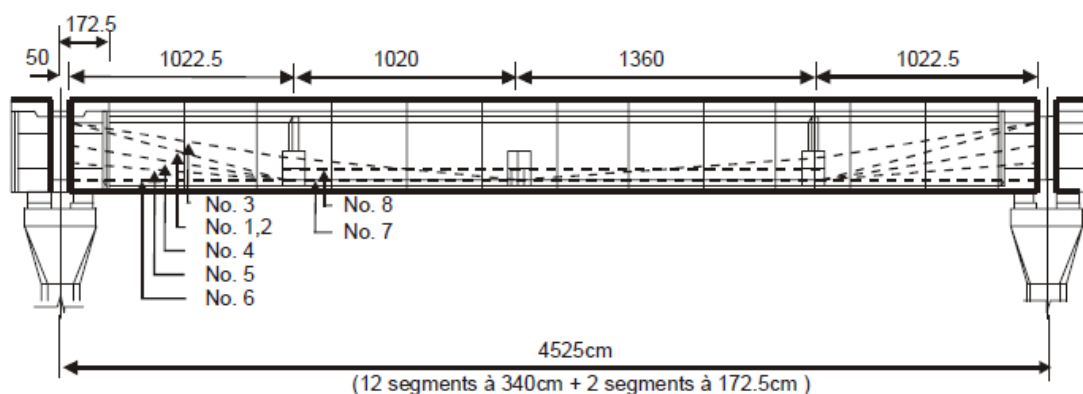


Fig. 3.24. – Vão da *"Second Stage Expressway System in Bangkok, Thailand"*. [40].

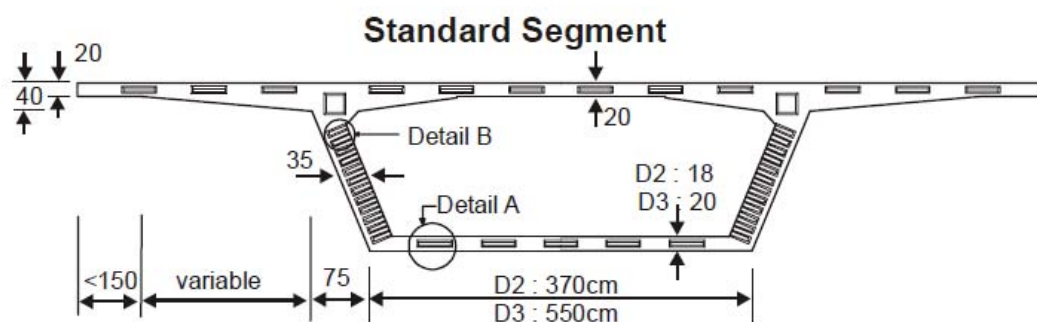


Fig. 3.25. – Secção transversal tipo da "Second Stage Expressway System in Bangkok, Thailand" [41].

Os resultados do processo comparativo estão apresentados na Figura 3.26., onde é relacionado o momento e a flecha a meio vão. Destaca-se uma correlação muito próxima entre os resultados numéricos e experimentais.

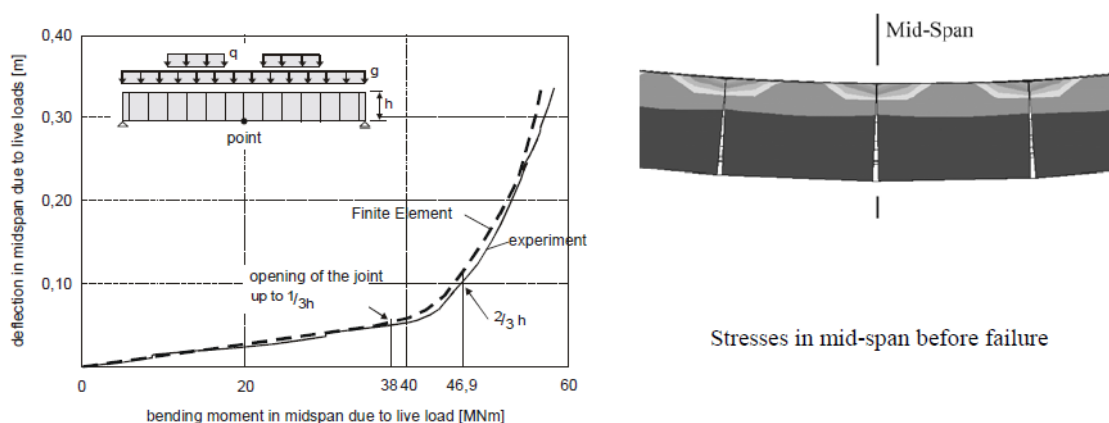


Fig. 3.26. - Comparação entre o comportamento estrutural real e os resultados da análise numérica [41].

Verifica-se que a estrutura apresenta um comportamento elástico-linear enquanto todas as juntas se encontrarem fechadas. Quando a primeira junta abre (a meio vão) a rigidez da estrutura decresce rapidamente e consequentemente aumenta a deformação estrutural. O crescimento da deformação torna-se novamente linear a partir do momento que o binário de forças fica praticamente constante (força de compressão na laje superior e tração no cabo de pré-esforço) [41], [45].

Esta situação é contrastante com a que se verifica numa superestrutura com juntas coladas com resina epóxi, onde se destaca o facto de rotações serem mais dispersas. A concentração de rotação nas juntas secas faz com que um tabuleiro por elas constituído atinja a rotura para menores valores de carga comparativamente a um com juntas coladas. Juntas epóxi exibem melhor performance nestas pontes do que as juntas secas [45]. O estudo veio ainda confirmar que as chaves de corte das aduelas têm uma grande influência sobre o comportamento face aos esforços de torção. A resistência das juntas sem as chaves de corte poderá ser insuficiente quando os efeitos de torção se tornam significativos.

3.6.4. PRÉ-ESFORÇO LONGITUDINAL

Entre diversos tipos de pré-esforço de pontes destacam-se dois. O primeiro com cabos internos aderentes e o segundo – com não aderentes ou parcialmente aderentes.

Ambas as técnicas apresentam comportamentos muito distintos a nível estrutural e exigem diferentes tipos de abordagem no cálculo da resistência última.

No caso de aplicação de cabos aderentes existe uma total compatibilidade entre a extensão do cabo e do betão adjacente e, deste modo é possível aplicar uma análise seccional. Isto é, com o aumento das ações exteriores a deformação induzida na estrutura é absorvida pelos dois materiais, os cabos de pré-esforço e betão e consequentemente a variação da extensão ao nível do centro de gravidade do cabo de pré-esforço toma um valor igual à variação da extensão do betão ao mesmo nível [45]. Destaca-se o facto que no sistema com aderência, ao abrir-se uma junta, os cabos sofrem deformações localizadas nessa região, aumentando consideravelmente a tensão no aço. Já nos cabos não aderentes, a extensão gerada pela abertura da junta dissipa-se em todo o comprimento do cabo, produzindo um menor alongamento do mesmo e consequentemente um menor incremento de tensão.

No caso de aplicação de cabos de pré-esforço não aderentes a deformação local do betão é absorvida ao longo de toda a extensão do cabo entre os respetivos pontos de ancoragem. Para a avaliação das deformações no betão é frequente considerar o comportamento não linear do mesmo [41].

Quanto aos princípios de funcionamento do pré-esforço aderente, os cabos para além de induzirem o esforço de compressão no tabuleiro, poderão funcionar como armadura passiva, tendo em conta o fenómeno de aderência entre os dois materiais, facilitando deste modo o controlo de fissuração. Em contrapartida os cabos não aderentes proporcionam somente o esforço de compressão.

Na prática o comportamento de ambas as soluções durante a aplicação das cargas baixas é semelhante. No entanto quando se trata de solicitações maiores os valores máximos de resistência para a mesma quantidade de pré-esforço são notavelmente diferentes.

A rotura de uma superestrutura com o pré-esforço exterior inicia-se pelo esmagamento do betão a meio vão, ocorrendo de uma forma relativamente gradual com a capacidade resistente a decrescer gradualmente com o aumento do deslocamento. Já numa superestrutura com pré-esforço aderente prevê-se uma rotura brusca, ainda que para valores de carga bastante superiores. Esta diferença no comportamento é abordada pela norma AASHTO que refere que no dimensionamento estático será requerido um maior número de cabos não aderentes para obter uma capacidade equivalente a um sistema de cabos aderente [45].

Quanto ao comportamento das juntas com a aplicação do pré-esforço exterior, face a solicitação de uma carga crescente e superior à prevista para o ELS, as mesmas entram em processo de descompressão e tendem a abrir-se. Caso a solicitação continue a aumentar, cresce o número de juntas fissuradas e a rotura ocorrerá provavelmente por esmagamento do betão devido ao grande incremento de tensões de compressão. A aplicação do pré-esforço não aderente poderá resultar numa redução da capacidade resistente última quando comparada com cabos aderentes. Essa situação acontece devido ao menor aumento de tensão nos cabos e a um aumento de tensão de compressão no betão [23].

Para o dimensionamento de cabos de pré-esforço poderá recorrer-se à análise não linear. Durante a pesquisa bibliográfica não foram encontradas equações normalizadas para o cálculo da tensão em cabos de pré-esforço exterior não aderentes em rotura. No entanto, existem certas equações que poderão dar um cálculo aproximado para cabos internos não aderentes. Essas equações poderão ser usadas para dimensionamento de cabos exteriores desde que se verifiquem determinadas condições: variação insignificante de excentricidade do cabo devido ao carregamento aplicado e atrito cabo/desviador muito

reduzido estando o cabo livre de se deslocar. Verificadas estas condições o comportamento dos dois tipos de cabos torna-se similar.

No âmbito da presente dissertação não se irão abordar detalhadamente os métodos de cálculo para o dimensionamento dos cabos de pré-esforço, no entanto importa referir que o comportamento das juntas tem influência no incremento de tensão nos cabos exteriores de pré-esforço. A norma AASHTO fornece uma série de coeficientes de redução para o cálculo da resistência à flexão e ao corte para as secções das juntas, para diferentes tipos de cabos e juntas, incluindo betonadas *in-situ*, coladas ou secas. Estes coeficientes auxiliam o projetista no processo previsão da capacidade de flexão da superestrutura usando uma análise seccional [45].

3.7. PARTICULARIDADES DE COMPORTAMENTO SÍSMICO

3.7.1. ENQUADRAMENTO

Considera-se que os tabuleiros de aduelas betonadas *in-situ* oferecem uma maior resistência face ao sismo devido à existência de armadura passiva contínua em toda a extensão da ponte [45]. Embora as ligações das juntas entre aduelas pré-fabricadas sejam consideradas monolíticas após o esticamento do pré-esforço longitudinal, a inexistência da armadura ordinária implica que durante o sismo os esforços entre segmentos sejam transferidos apenas através das chaves das aduelas e o pré-esforço, e com isso as juntas traduzem-se em pontos de descontinuidade, que por sua vez permitem a formação de rótulas plásticas. A incerteza associada à resposta das juntas entre aduelas pré-fabricadas torna-se um dos principais impedimentos na aplicação deste método construtivo em zonas de grande atividade sísmica.

Todavia, a construção de pontes com aduelas pré-fabricadas pode ser utilizada em zonas sísmicas desde que se garanta um correto dimensionamento. De modo a alcançar esse objetivo é imprescindível considerar certas particularidades a nível estrutural e construtivo.

O Guia de Especificações para Dimensionamento e Construção de Pontes Segmentares I (AASHTO) permite a utilização de pré-fabricados na construção de pontes em zonas com sismicidade elevada, desde que se garanta a aplicação da resina epóxi nas juntas entre aduelas ou as mesmas sejam betonadas *in-situ*. A mesma Especificação AASHTO estabelece igualmente recomendações adicionais para as pontes de aduelas pré-fabricadas sem armadura ordinária nas juntas, nomeadamente que os cabos externos não excedam mais de 50% os cabos pós-tencionados da superestrutura e que o pré-esforço interior deva ser suficiente para suportar 130% da carga permanente atuante na estrutura. Para além das referidas, o regulamento possui uma outra recomendação adicional para construção em áreas sísmicas, os cabos de pré-esforço devem atravessar todas as juntas entre aduelas. São definidos limites ao pré-esforço com o intuito de alcançar a ductilidade adequada na superestrutura. A norma AASHTO (1998) apresenta um limite máximo de aço de pré-esforço. A razão do mesmo resulta da exigência de que todo o aço atinja a cedência quando a capacidade última de resistência for atingida. Contudo importa referir que as recomendações apresentadas consideram-se bastante conservadoras, tendo em vista que se basearam em escassas pesquisas acerca de resposta sísmica das pontes executadas com aduelas pré-fabricadas [29].

Tem crescido o interesse acerca do comportamento das juntas durante a ocorrência sísmica, particularmente de abertura de fendas nas juntas e na medida em que se altera o comportamento estrutural da ponte.

3.7.2. COMPORTAMENTO DAS JUNTAS ENTRE ADUELAS PRÉ-FABRICADAS FACE A AÇÃO SÍSMICA

Durante a ocorrência sísmica as juntas das pontes construídas com aduelas pré-fabricadas experimentam grandes deslocamentos e repetidas rotações sob ações cíclicas, o que por sua vez torna o processo de dimensionamento bem mais complexo quanto às exigências de ductilidade, comparativamente com as pontes betonadas *in-situ*.

Tendo em conta a necessidade de garantir uma resistência à flexão mínima em cada junta, recorre-se à aplicação do pré-esforço longitudinal em pontos onde as ações permanentes e variáveis não o exigiam.

A performance sísmica de pontes construídas com aduelas pré-fabricadas deu origem a vários estudos e ensaios comportamentais. *Megally et al* [29], investigaram sobre o desempenho sísmico deste tipo de pontes aplicando análises não lineares e investigações experimentais. As análises não lineares demonstraram que a força efetiva de pré-esforço (superestrutura pré-esforçada internamente com juntas coladas) se reduzia após ação sísmica, especialmente se as juntas fossem sujeitas a aberturas ou rotações significativas. Os ensaios experimentais revelaram que as juntas podem experimentar aberturas significativas e repetidas sob ações cíclicas reversíveis sem atingir a rotura, apesar do facto de não haver armadura de continuidade. Conclui-se também que a resina epóxi possibilita uma melhor performance sísmica destas pontes em termos de dissipação de energia e redução de deslocamentos/deformações permanentes nas juntas [29] [45].

Deve ser realçado o facto de que uma superestrutura com pré-esforço interior dissipa mais energia que uma com pré-esforço exterior. Contudo, as superestruturas são normalmente dimensionadas para se comportarem em regime elástico, daí os mecanismos de dissipação de energia serem essencialmente incumbidos aos pilares [45].

A combinação de pré-esforço interior e exterior, nas superestruturas de pontes de aduelas pré-fabricadas, em zona de elevada sismicidade, deve ser evitada pelo facto de a força resistente não ser simultaneamente partilhada, mas sim de uma forma sequencial, com o pré-esforço interior a suportar a maior parte das ações até à rotura [45]. A norma AASHTO atualmente permite a combinação, no entanto recentes estudos demonstram a necessidade de revisão da correspondente secção incluída na norma. Esta conceção poderá levar a um prematuro estado de cedência seguido da rotura dos cabos de pré-esforço interior. Conclui-se portanto que a combinação de pré-esforço interior e exterior resulta numa menor ductilidade e capacidade de deformação estrutural. Deste modo, deve-se preferir a adoção da totalidade do pré-esforço exterior de forma a minimizar os deslocamentos/deformações permanentes da superestrutura pós-sismo, bem como as aberturas permanentes das juntas entre aduelas, melhorando-se a ductilidade da superestrutura. Importa referir que estruturas com a totalidade do pré-esforço exterior, eventualmente, devem ser dotadas de cabos de pré-esforço no topo da secção com o intuito de resistir à inversão das deformações a meio vão [29].

4

SEGURANÇA E COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS JUNTAS

4.1. PRINCIPAIS CAUSAS DE INCREMENTO DAS TENÇÕES NAS JUNTAS

No dimensionamento estrutural de uma ponte deverão ser consideradas todas as fases da sua operação e do seu processo construtivo, deverá procurar-se que o processo construtivo seja o mais neutro possível quanto aos esforços gerados na estrutura, porém nem sempre é exequível atingir a absoluta neutralidade.

4.1.1. SOBRECARGAS DE CONSTRUÇÃO

As sobrecargas de construção é um fator indispensável para o dimensionamento do processo de construção de uma ponte.

Uma avaliação deficiente de sobrecargas na construção traduz-se em esforços estruturais não quantificados que poderão causar danos irreversíveis nas interfaces de aduelas ou, no limite provocar acidentes muito graves.

Por exemplo no caso de execução de pontes por avanços sucessivos com recurso a equipamentos construtivos (vigas de lançamento, lançadeira de aduelas, carros de avanço, etc.), é crucial a consideração do desenvolvimento de esforços ao longo de todo o processo construtivo, tendo em conta o facto do diagrama de esforços se alterar progressivamente. No caso de construção com recurso ao carro de avanço, esse facto está relacionado com o aumento da consola (braço de atuação de força), e o esforço que o equipamento construtivo exerce sobre o tabuleiro.

A principal precaução consiste em garantir uma avaliação cuidadosa dos esforços inerentes ao desenvolvimento da obra, do peso do equipamento construtivo e da mudança dos apoios deste, dos pesos próprios dos materiais constituintes, qualquer que seja o método construtivo utilizado.

Importa referir a relevância da consideração de possíveis sobrecargas acidentais durante o processo construtivo, que poderá ser fulcral para a diminuição de danos estruturais no caso de uma ocorrência acidental.

4.1.2. DEFORMAÇÃO DO EQUIPAMENTO CONSTRUTIVO

A interação do equipamento construtivo com a estrutura deve ser analisada nas distintas fases do desenvolvimento da obra, considerando por sua vez os esforços gerados devido à alteração do carregamento. Destas podem resultar, por exemplo, a necessidade de aplicação de uma maior quantidade

de pré-esforço, consideração de esforços residuais no tabuleiro [45] ou execução de ajustes no equipamento construtivo.

O esforço gerado pelo posicionamento das aduelas, que por sua vez poderá ser traduzido pela alteração dos esforços devido à deslocação relativa da aduela para a sua posição final, também poderá gerar deformações no equipamento construtivo, e a sua consideração deve ser tida em linha de conta durante o processo de dimensionamento do procedimento construtivo de modo a limitar o seu efeito nos esforços gerados nas interfaces de colagem.

Por norma o estudo estrutural do equipamento elabora-se bastante cuidadosamente, no entanto importa referir que nem sempre é feita uma abordagem exaustiva dos efeitos de interação da estrutura e do equipamento construtivo.

Por exemplo a consideração de interação de efeitos de rigidez à flexão do equipamento construtivo e do tabuleiro, são de extrema importância para a análise das deformações (este assunto abordar-se-á com maior detalhe em 4.3.1.5.).

Dito isso destacam-se os principais cuidados a ter em consideração:

- Elaboração de uma análise exaustiva de todo o processo construtivo com a finalidade de comprovar a segurança de toda a operação de execução;
- Fornecimento de manuais de utilização inerentes ao processo construtivo e ao equipamento de fácil interpretação pelo pessoal operador;
- Formação adequada de todos os operadores envolvidos no processo de construção;
- Cumprimento de todos os requisitos impostos pelo fabricante do equipamento construtivo;
- Procedimentos simples e lógicos para facilitar o entendimento dos operadores e reduzir a probabilidade de erro humano.

No caso de estudo da construção da Ponte sobre o Canal das Laranjeiras, que será abordado no subcapítulo 4.3., o controlo das deformações do equipamento construtivo é feito com recurso ao Sistema OPS que será oportunamente descrito adiante.

4.1.3. EFEITO DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

As variações térmicas induzem deformações adicionais em estruturas provocando consequentemente esforços no caso de existência de restrições de deslocamentos. Contudo, as obras de arte por norma são dotadas de juntas e aparelhos de apoio adaptados de modo a acompanhar esses deslocamentos ao longo da vida útil.

No âmbito da presente dissertação importa referir a importância das variações térmicas durante o processo construtivo, visto que poderá causar esforços adicionais nas juntas e por consequência influenciar o desempenho da resina epóxi.

Destacam-se dois tipos de ação térmica considerados normalmente no dimensionamento de pontes e viadutos: variação uniforme de temperatura e variação diferencial. O primeiro traduz a variação térmica associada à mudança temporal (inverno/verão, dia/noite), enquanto o segundo traduz o efeito produzido pela radiação solar ao incidir diretamente sobre a parte superior do tabuleiro provocando a variação térmica entre a laje de topo e a laje inferior (Figura 4.1.).

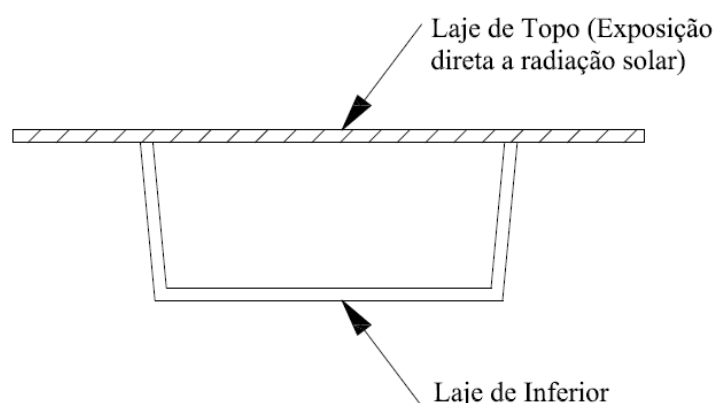


Fig. 4.1. – Representação esquemática de uma aduela pré-fabricada face à ação térmica diferencial.

No que diz respeito ao processo construtivo, a variação diferencial poderá ser considerada mais gravosa visto que podem ocorrer variações térmicas de 1° a 4°C entre faces opostas de uma aduela pré-fabricada (Figura 4.2.). Ainda que, caso se trate de prazos de construção muito alargados, condições climáticas adversas e restrições de apoios do tabuleiro durante o processo construtivo importa ter em consideração a ação da variação térmica uniforme.

4.1.4. DEFICIENTE CONTROLO GEOMÉTRICO

A deficiente execução do controlo geométrico reflete-se diretamente nas tensões geradas nas juntas, provocando um incremento de tensão de complexa quantificação.

Além disso a falta de controlo geométrico tanto durante a fase de pré-fabricação como durante o posicionamento das aduelas em obra poderá exigir aplicação de métodos corretivos, que são normalmente dispendiosos e de difícil implementação.

É importante a execução de leituras paralelas e independentes de modo a diminuir a possibilidade do erro humano e computacional.

Por vezes é difícil determinar com grande precisão o esforço adicional gerado pela aplicação das ações corretivas na geometria do tabuleiro, contudo caso exista essa necessidade, deve-se proceder ao cálculo, o mais completo possível, para determinação dos esforços adicionais. Após a obtenção de valores dos respetivos esforços, é crucial a verificação do cumprimento dos limites das tensões permitidas nas juntas entre as aduelas apresentadas em 3.6.1.

4.1.5. DEFEITOS NAS SUPERFÍCIES DE CONTACTO

Tendo em conta que a qualidade das superfícies de contacto entre as aduelas pré-fabricadas tem grande importância no sucesso da construção do tabuleiro, destaca-se a necessidade de ter alguns cuidados básicos.

Existem vários fatores que podem alterar a geometria das faces das aduelas como por exemplo: um jato de areia excessivamente forte, acidentes durante o transporte ou armazenamento, fissuração e posterior

destacamento do betão constituinte das aduelas. Esses fatores poderão pôr em causa o encaixe perfeito entre as aduelas que por sua vez dificultará a correta aplicação da resina epóxi.

Para além dos aspetos associados ao controlo geométrico do tabuleiro referidos em 3.4., os defeitos nas ligações induzem esforços adicionais nas interfaces, por vezes de complexa quantificação, ou no limite impossibilitando o encaixe entre os segmentos.

Os defeitos nas aduelas e, sobretudo nas superfícies de união poderão provocar os atrasos no normal desenvolvimento do trabalho e acréscimo de custo associado. Qualquer tipo de reparação de aduelas deve ser devidamente inspecionado e a sua viabilidade comprovada pelo projetista.

Destaca-se o facto de que as reparações mal sucedidas ou qualquer falta de ajuste irá causar danos estruturais traduzidos pelas concentrações de tensões após o esticamento do pré-esforço.

Dito isto a qualidade das superfícies de contacto tem de ser assegurada tanto durante o processo de pré-fabricação, como no transporte, armazenamento e no processo de elevação.

4.1.6. FATOR DO ERRO

4.1.6.1. Tipos de Erros

Um dos aspetos que provoca maior ameaça à segurança estrutural e que por sua vez, poderá influenciar uma parte significativa das causas de incremento de tensões nas interfaces de ligação das juntas descritos anteriormente, são os erros decorrentes de operação deficiente.

As principais causas subjacentes poderão ser classificadas de seguinte forma [27]:

- Um equívoco conceitual de um ou mais aspetos da utilidade estrutural por parte da projetista ou empreiteiro;
- Aplicação de suposições incorretas durante a elaboração do projeto;
- Erros computacionais;
- Falta de comunicação entre as partes integrantes de todo o processo de elaboração do projeto;
- Falhas e omissões na descrição de materiais e equipamentos, bem como omissão de erros durante a execução da obra.

Na prática quase todos os erros mencionados acima poderão ser eliminados recorrendo sistematicamente aos procedimentos de controlo. No entanto, a diminuição de probabilidade de acontecimento dos erros inerentes ao equívoco conceitual pressupõe o reconhecimento e compreensão completa de todos os problemas críticos, bem como a capacidade de analisar e resolvê-los em termos dos requisitos específicos. No caso de construção de estruturas altamente complexas, como é o caso de pontes e viadutos, deve recorrer-se ao pessoal altamente preparado e com experiência na área comprovada, ainda que os projetos precisem de ser submetidos a revisões e análise por equipas de especialistas independentes.

O facto do custo inerente à revisão do projeto por vezes ser elevado leva, na prática, à redução de certos procedimentos de controlo, sendo apresentados apenas comentários de natureza mais superficial pelo pessoal experiente. Ainda que possibilita a redução do risco de grandes erros conceituais.

O desenvolvimento de procedimentos de controlo e o *feedback* sistemático deve ser incorporado em todas as fases de pesquisa e planeamento de modo a diminuir a possibilidade de erros durante a elaboração e execução do projeto.

Na verdade, o aumento das despesas no projeto reduz o custo estrutural, risco e, por vezes custos de manutenção. No caso de grandes estruturas, estes fatores podem ser uma consideração essencial.

4.1.6.2. Erro Humano

Tendo em conta que a natureza de projeto e o processo de construção apresentam-se maioritariamente de extrema singularidade no que diz respeito a pontes e viadutos, torna-se claro o facto do grau de participação humana ser de tal forma elevado, que os efeitos de negligência ou ignorância aumentam consequentemente o risco de erros grosseiros. Vários acontecimentos recentes vieram a comprovar essa afirmação [27]. Tendo em conta a polémica do problema, elaboram-se inúmeros estudos acerca da importância estatística de erro humano no projeto e a influência dos procedimentos de verificação sistemática.

Como mencionado anteriormente, para reduzir o risco e as causas subjacentes requer-se excelente organização e gestão, bem como uma comunicação eficaz a todos os níveis. Objetivos e metas devem ser claramente definidos e as estratégias e procedimentos planeados com devida antecedência.

Destaca-se também a importância de interação eficaz entre diversas fases de atividade com *feedback* regular para a verificação, comparação, revisão e confirmação de todos os processos, ou seja, eficiência de trabalho em equipa. Os eventos que conduzem a erros seguem geralmente inúmeros padrões devido aos atributos peculiares dos indivíduos. Estes padrões podem ser reconhecíveis para que possam ser tomadas medidas necessárias de modo a reduzir o risco da sua ocorrência.

Geralmente as complicações dizem respeito a efeitos secundários que poderão ser ampliados sob certas condições que, por sua vez causam problemas graves derivados da inobservância da modelagem matemática para a análise estrutural. Tem havido alguns exemplos recentes de tais falhas, especialmente durante o processo de construção.

O desenvolvimento acelerado de métodos computadorizados vão abrindo muitas oportunidades como por exemplo aumento da eficiência, precisão de análise de viabilidade estrutural, especialmente no que diz respeito a estruturas de elevado grau de complexidade. Ainda que, pese o facto de haver um elevado grau de risco inerente ao erro humano devido à falta de compreensão completa pelos usuários das capacidades e limitações de programas de cálculo específicos.

Por um lado em certos aspetos a informatização eliminou a necessidade do projetista entender completamente algumas das complexidades do comportamento estrutural na sua análise, o que apresenta ser uma ameaça; por outro lado, abriu grandes oportunidades para aumentar essa compreensão e remoção de riscos que tinham sido inerentes à prática do projeto no passado.

Neste contexto importa também referir a importância da diminuição de probabilidade de erro durante a execução de obra, visto que atualmente a maior parte do erro humano acontece exatamente em obra. A complexidade de operações deverá ser reduzida para que possa ser entendida facilmente, não deixando de parte a formação adequada dos operadores e devido controlo.

4.2. RESINA EPÓXI

4.2.1. DEFINIÇÃO

Atualmente, o desenvolvimento de compósitos formados por matrizes poliméricas reforçadas por fibras naturais é uma das áreas de grande interesse no que diz respeito à pesquisa de compósitos.

Tendo em conta a crescente necessidade de obtenção de matérias de elevada qualidade e custo relativamente reduzido, os compósitos vieram a ser utilizados em inúmeras áreas. Na presente dissertação dar-se-á maior destaque à aplicação de compósitos na área de engenharia civil ou, mais precisamente, na colagem de aduelas pré-fabricadas.

Sensivelmente a partir da década de 90 os requisitos e leis ambientais para materiais compósitos, bem como a regulamentação aplicável ao uso de resinas e fibras sintéticas obriga que as técnicas de processamento fossem cada vez menos poluentes e com a utilização de matérias-primas provenientes de fontes naturais.

A resina epóxi é uma resina sintética obtida por reações de condensação e caracteriza-se pela presença de anéis epóxi que são, por sua vez, grupos constituídos por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono. Deste modo é formada uma estrutura cíclica, sendo que a reação do grupo epóxi com um agente “reticulante” adequado (agente de cura) resulta em uma estrutura molecular tridimensional, Figura 4.2. [32].

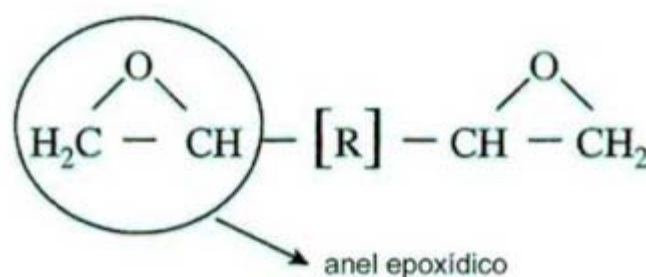


Fig. 4.2. - Estrutura molecular da resina epóxi [32].

As resinas epóxi utilizadas em compósitos de elevado desempenho apresentam grande resistência mecânica e boa oposição à degradação ambiental. Esses fatores proporcionam a sua aplicação na área de engenharia civil.

Após a mistura do composto de resina com o endurecedor dá-se um fenómeno químico de cura que pode levar de alguns minutos a umas horas, em função das proporções utilizadas e das condições climatéricas. A cura será tanto mais rápida quanto mais elevadas forem as temperaturas do meio envolvente e quanto maior for a proporção do endurecedor. No caso da colagem de aduelas pré-fabricadas o tempo de cura deve ser o suficiente para permitir a montagem que se traduz, em casos práticos, em algumas horas.

O uso dos adesivos de epóxi para colagem de aduelas representa um grande desafio para a tecnologia de produção, bem como para os próprios produtores. As características de aplicação e a escolha adequada do ligante devem ser cuidadosamente analisados.

4.2.2. DESENVOLVIMENTO DE APLICAÇÃO DE RESINAS EPÓXI NA COLAGEM DE ADUELAS

A técnica de construção de pontes com recurso a aduelas pré-fabricas foi desenvolvida essencialmente para a execução rápida e segura de tabuleiros de pontes e viadutos. Ao longo dos anos a técnica foi progressivamente refinada devido à experiência adquirida. De seguida abordar-se-á o processo de desenvolvimento com fim a entender as últimas melhorias e as modificações no conceito original.

4.2.2.1. Importância da Resina Epóxi no Processo de Colagem de Aduelas de Primeira Geração

Nas primeiras estruturas executadas com a aplicação de resina epóxi destacam-se vários papéis importantes [6]:

- I. Durante a montagem de aduelas (antes do endurecimento de resina):
 - Oferecer a lubrificação necessária para um correto encaixe entre as aduelas pré-fabricadas;
 - Preencher completamente todas as imperfeições existentes nas peças de betão a ligar.
- II. Na estrutura final (após o endurecimento da resina):
 - Proteger a armadura ativa e passiva da ação deterioradora de água e substâncias por ela transportadas;
 - Assegurar a adequabilidade da junta para transmissão das tensões de compressão e de corte através da interface;
 - Proporcionar uma integridade estrutural ao tabuleiro, oferecendo uma ligação monolítica.

As primeiras aduelas possuíam apenas uma chave em cada alma na interface de colagem, que servia para se obter a mesma posição relativa na colocação.

Após a junção de duas aduelas consecutivas aplicava-se um pré-esforço temporário de modo a assegurar uma ligação monolítica entre aduelas e permitir uma cura adequada da resina epóxi.

A escolha inadequada da resina epóxi a aplicar nas interfaces de colagem pode ser um fator crítico no que diz respeito a resistência ao corte das juntas. Assim persiste grande necessidade de garantir um rigoroso controlo tanto na escolha da resina, como durante o processo de aplicação e de cura.

4.2.2.2. Importância da Resina Epóxi no Processo de Colagem de Aduelas de Segunda Geração

Vários incidentes em França e mais recentemente nos Estados Unidos vieram provar que as condições necessárias para garantir o desempenho requerido de resina nem sempre são alcançadas.

As características e o desempenho das primeiras estruturas construídas com aduelas pré-fabricadas são, sem dúvida fulcrais para a investigação e melhoria de qualidade de novos tipos de juntas, que permitam a transmissão de forças de corte sem consideração da resistência de resina epóxi.

O passo lógico na melhoria das juntas com resina epóxi foi excluir qualquer tipo de resistência estrutural esperada do polímero. As aduelas de segunda geração preveem exatamente isso, visto que são dotadas de várias chaves de corte tanto nas almas como nos banzos de aduelas. Essa configuração permite melhoria no comportamento das ligações, retirando o papel de resistência estrutural da resina e oferecendo simplicidade e segurança ao processo construtivo. Existem inúmeros casos de sucesso desta técnica na construção de pontes por todo mundo.

4.2.3. EXEMPLO PRÁTICO DO COMPORTAMENTO DAS JUNTAS

Como exemplo do estudo prático do comportamento das juntas entre aduelas apresentam-se os testes realizados durante a construção da ponte sobre rio Niterói no Brasil [39].

De modo a verificar o comportamento estrutural das juntas entre aduelas de chaves múltiplas e com aplicação da resina epóxi foram feitos vários ensaios. Foi elaborado e testado um modelo à escala 1:6

de modo a representar um tabuleiro típico, apoiado no pilar com as respectivas aduelas de ambos os lados como se demonstra na Figura 4.3.

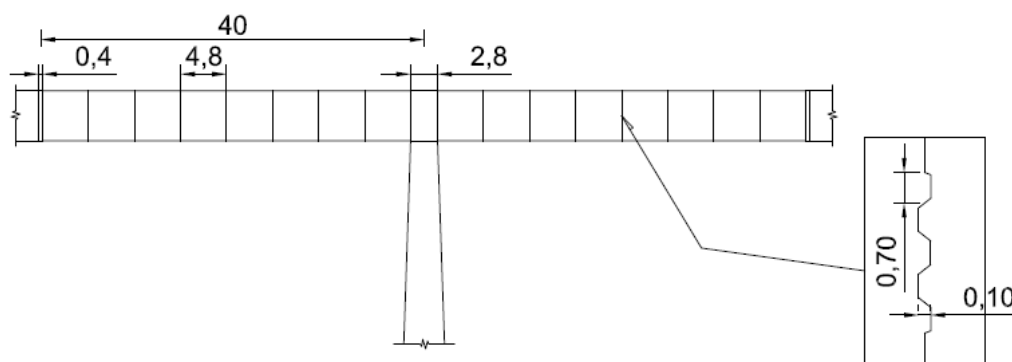


Fig. 4.3. – Modelo utilizado no ensaio (unidades em metros).

O processo de fissuração na alma desenvolveu-se quando a carga do ensaio foi aumentada acima da carga de projeto. As juntas de epóxi não tiveram qualquer influência na continuidade das fissuras da alma, e o comportamento da estrutura segmentar até ao final foi exatamente o mesmo que o de uma estrutura monolítica.

A fissuração ocorreu devido ao esmagamento de betão, e a primeira fenda por flexão ocorreu para 93% da carga prevista nos cálculos à rotura.

Posteriormente foram realizados outros ensaios a fim de estudar a transferência de esforços na diagonal de tensões principais de compressão através das juntas (Figura 4.4.). Foram preparados e ensaiados provetes prismáticos, uns com corte liso e outros com chaves. Tiveram-se em conta vários valores do ângulo entre a tensão principal e o eixo neutro da peça, β . No caso da obra no Niterói o valor de β situava-se entre 30 e 35°. Para uma estrutura de betão armado corrente esse valor assume no máximo 45° (segundo a orientação de modelo de escoras e tirantes).

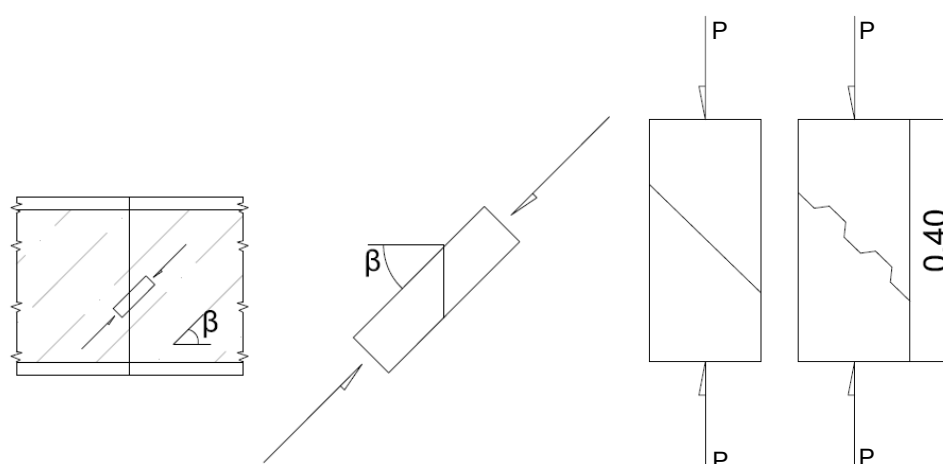


Fig. 4.4. – Representação esquemática da diagonal de tensões principais de compressão.

Os ensaios preliminares mostraram que a junta de epóxi tinha uma eficiência de 92% em comparação com uma amostra monolítica (razão entre a carga máxima P nas amostras prismáticas com juntas epóxi e nas amostras monolíticas). Para várias inclinações das juntas os resultados são os que seguem no Quadro 2:

Quadro 2 – Representação de eficiência em função da inclinação da junta.

β	0°	15°	30°	45°	60°
Eficiência	94%	92%	98%	95%	70%

Após a avaliação dos resultados apresentados no Quadro 2, podemos concluir que para valores de β inferiores a 45° (abrangendo todo domínio de elementos de betão pré-esforçado) a resistência à compressão é pouco afetada pela presença da junta inclinada.

Todos os ensaios realizados vieram confirmar os estudos experimentais anteriormente efetuados, que, por sua vez demonstraram que as juntas com resina epóxi são seguras desde que a resina seja de adequada qualidade, com proporções de mistura apropriadas e procedimentos de aplicação constantemente controlados.

Conquanto, destaca-se o facto que as aduelas com múltiplas chaves (Figura 4.6.) incorporam o conceito que prevê segurança, simplicidade e poupanças de custos, diminuindo o risco que inadequada aplicação de resinas epóxi nas interfaces de colagem, comprometa a segurança estrutural.

As almas e os banzos das aduelas normalmente devem ter um elevado número de pequenas chaves tipo macho-fêmea concebidas para transmitir todas as tensões através da junta sem qualquer contributo da resina. Na Figura 4.5. apresenta-se a comparação entre o comportamento estrutural de uma junta com uma única chave na alma e outra com várias chaves, assumindo-se que a resina epóxi foi aplicada e endurecida inadequadamente.

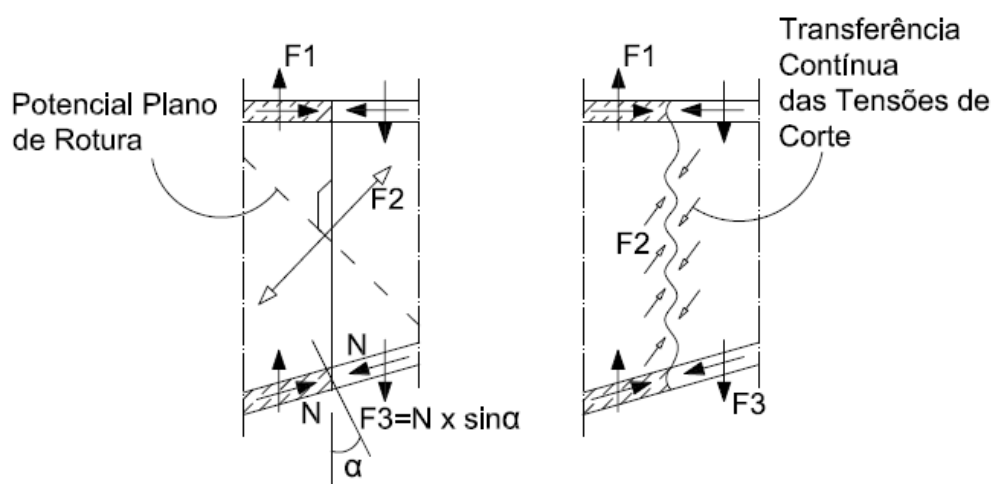


Fig. 4.5. – Conceito de transferência de esforços entre aduelas (única chave vs. múltiplas).

Com as dimensões atualmente utilizadas para a profundidade e altura de chaves, a capacidade global da junta é normalmente muito superior ao mínimo exigido para transferir tensões diagonais com segurança até o estado limite último de carregamento.



Fig. 4.6. – Aduela com múltiplas chaves [67].

4.2.4. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

De modo a clarificar o conceito de resina epóxi na colagem de aduelas pré-fabricadas, importa abordar algumas das suas características físicas e mecânicas, bem como as precauções necessárias a ter em conta para obtenção de um resultado final satisfatório e alguns possíveis ensaios para determinação destas características.

4.2.4.1. Propriedades Físicas

- Cor

Por norma a resina possui uma cor diferente do endurecedor de modo a evitar a troca. No entanto, após a mistura, o produto final frequentemente tem uma cor cinzenta, à semelhança do betão, e homogênea.

- Prazo de validade

Tanto a resina como o endurecedor podem ser armazenados durante um ano a temperatura ambiente entre 10 a 20°C [39]. No entanto o prazo poderá variar conforme as indicações do fabricante. Após três meses de armazenamento é necessário verificar a qualidade, garantindo que a resina epóxi não apresente cristalinidade. Caso presente – é necessário proceder a tratamentos especiais antes da sua aplicação.

- Tempo de vida útil da mistura

O tempo de vida útil da mistura da resina epóxi traduz-se pelo intervalo de tempo entre a mistura dos constituintes e o momento de endurecimento. A trabalhabilidade da mistura é determinada pela sua temperatura interna, dependendo da proporção de resina epóxi utilizada. Em obra a mistura de resina epóxi deve ser aplicada à superfície de betão dentro do tempo previsto, conforme especificação do fabricante. Para 5 kg do produto final misturado sob condições isotérmicas, apresentam-se os limites térmicos para a trabalhabilidade no Quadro 3 e a duração aproximada da vida útil no Quadro 4 [39]:

Quadro 3 - Limites térmicos para a trabalhabilidade [39].

Classe de Resina	Limite de Temperatura para Trabalhabilidade
5 a 15°C	40°C
15 a 25°C	40°C
25 a 40°C	55 a 60°C

Quadro 4 – Exemplo de duração aproximada da vida útil da resina epóxi segundo *Podolny et al* [39].

Classe de Resina	Temperatura Ambiente					
	5°C	10°C	15°C	20°C	30°C	35°C
5 a 15°C	40 min.	15 min.				
15 a 25°C			20 min.	15 min.		
25 a 40°C					25 min.	18 min.

- Tempo para aplicação de resina

O tempo de aplicação de epóxi, ou chamado tempo de abertura da cola, é definido pelo período entre a sua aplicação à superfície do betão e o momento em que ela atinge o seu limite de trabalhabilidade. O tempo de abertura não deverá ser inferior a umas horas, independentemente da classe da resina utilizada de modo a permitir uma aplicação eficaz.

Para a medição do tempo de abertura da resina poderá recorrer-se ao dispositivo designado pela *Agulha de Vicat* apresentado na Figura 4.7. No ensaio aplica-se uma camada de 1 mm de resina na placa de aço e de seguida mede-se o tempo de penetração da agulha até a profundidade de 0,5 mm. O tempo de penetração traduz-se no tempo de abertura de epóxi.

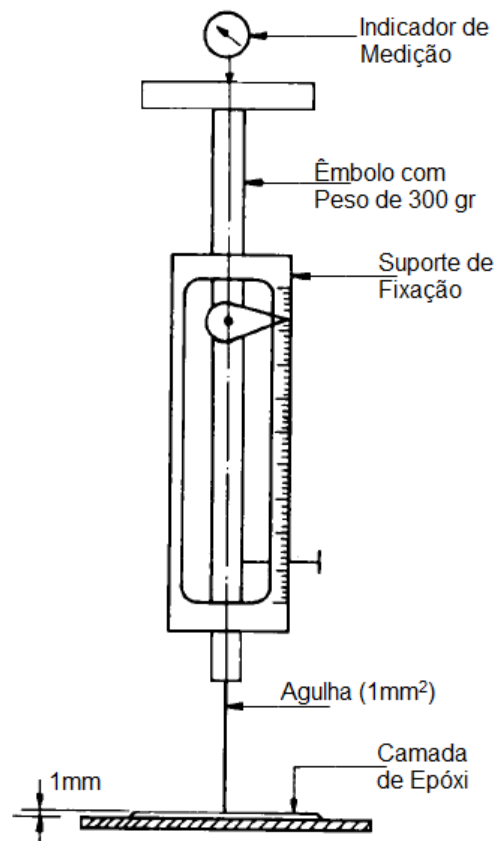


Fig. 4.7. – Representação esquemática da Agulha de Vicat [39].

▪ Tixotropia

Esta característica dá uma indicação da capacidade de aplicação da resina epóxi a superfícies verticais. Tixotropia pode ser medida utilizando o *Medidor de Daniel*. Para a execução do ensaio coloca-se o indicador sobre uma superfície plana com “calha” de seção horizontal. A “calha” é então preenchida com mistura de resina e endurecedor e virada para a posição vertical, como representado na Figura 4.8. De seguida regista-se o tempo de escoamento. O ensaio deve ser levado a cabo à temperatura máxima especificada para a resina a testar. Uma resina que flui menos de 30 mm em 10 minutos é adequada para aplicação a superfícies verticais de betão [39]. Existem outros tipos de ensaios para a determinação de tixotropia, como por exemplo através dos dispositivos de escoamento especificados na norma ASTM D2730-68.

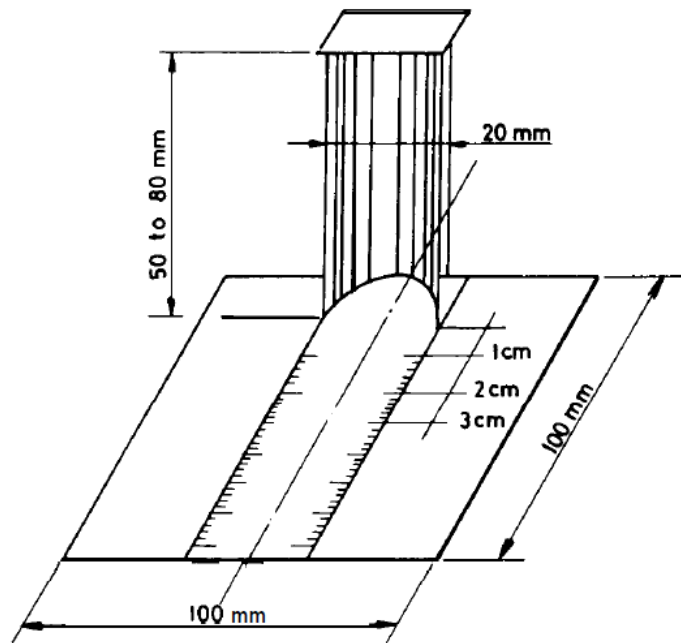


Fig. 4.8. – Representação esquemática do *Medidor de Daniel* [39].

- Outras características da resina epóxi que poderão ser determinadas *in-situ*

O ângulo de atrito interno: a facilidade com que o excesso de resina é expulso para fora da junta quando sujeita a uma pressão uniforme.

Retração: deve ser praticamente nula.

Taxa de absorção de água e solubilidade em água: a absorção de água máxima admissível é de 12%; a solubilidade máxima permitida para resina epóxi em água a 25°C é de 4% [39].

4.2.4.2. Propriedades Mecânicas

- Resistência ao corte

A resistência ao corte da resina epóxi pode ser determinada com ensaio de provetes mistos de betão e resina com as dimensões de 4 x 4 x 16 cm e uma interface de colagem com resina epóxi com ângulo de aproximadamente 45° (Figura 4.9.). Os provetes são executados com o betão correspondente ao utilizado para a execução de aduelas. Após a betonagem dos provetes, os mesmos são submersos em água durante sete dias. Feito o processo de cura, os provetes devem ser limpos com recurso a escovagem com escovas de aço ou outro método semelhante para remoção da pasta de cimento. De seguida aplica-se uma camada de aproximadamente 2mm de resina nas faces a colar e posteriormente uma tensão de compressão na interface de 0,15 MPa durante sete dias nas condições esperadas em obra. Concluído o processo de preparação de provetes procede-se ao ensaio. Normalmente a tensão mínima de corte não deverá ser inferior a 10 MPa [39].

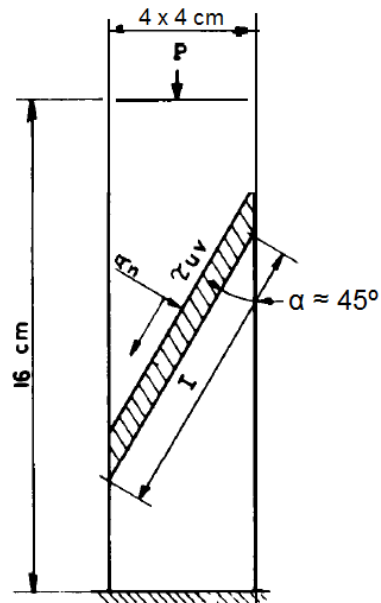


Fig. 4.9. – Representação esquemática do provete misto [39].

▪ Módulo de Distorção

O módulo de distorção poderá ser instantâneo ou de longa duração. O primeiro, por norma deverá ser superior a 1500 MPa, ainda que a temperatura ambiente do ensaio deva respeitar a classe da resina. O segundo normalmente é superior a 1000 MPa e a medição é levada a cabo 28 dias após a execução do provete. A medição poderá ser feita com equipamento apresentado na Figura 4.10. e provetes de resina cilíndricos. Destaca-se o facto de certas resinas epóxi apresentarem uma sensibilidade excessiva a temperaturas elevadas o que torna inaceitável o seu uso em climas quentes. Para esses climas são normalmente preparadas resinas específicas.

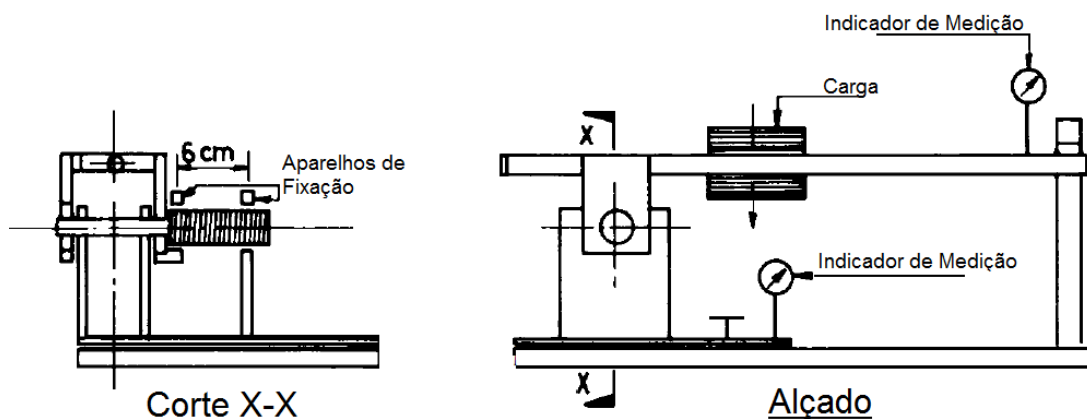


Fig. 4.10. – Equipamento de medição do módulo de distorção [39].

- Resistência à compressão

A resistência à compressão poderá ser determinada com provetes cúbicos de resina. O ensaio é levado a cabo após a cura de 24 horas à temperatura ambiente máxima indicada para a classe de resina a ensaiar. Para uma taxa de carregamento de aproximadamente 25 MPa por minuto, a resistência à compressão deve ser no mínimo 80 MPa [39].

- Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade poderá ser determinado com provetes cúbicos de resina, curados durante sete dias à temperatura ambiente máxima indicada para a classe de resina a ensaiar. A dimensão dos provetes pode ser idêntica ao do ensaio de resistência à compressão. O valor do módulo de elasticidade por norma não deve ser inferior a 7850 MPa [39].

4.2.5. APLICAÇÃO DE RESINAS EPÓXI NA COLAGEM DE ADUELAS

A aplicação e o desempenho do adesivo poderá fazer toda a diferença na construção e no desempenho de uma ponte de aduelas pré-fabricadas. Ainda que, e como mencionado acima, a utilização de várias chaves de corte nas interfaces de colagem reduz consideravelmente o papel estrutural da resina.

As resinas epóxi aplicadas na colagem de aduelas pré-fabricadas são geralmente de cura normal ou lenta, posto que as condições de utilização requerem tempo suficiente de montagem. Já no que diz respeito à temperatura do meio ambiente durante a aplicação, o mercado atual oferece uma vasta gama de tipos de resinas. No geral a faixa térmica varia entre 20° F a 115° F (aproximadamente entre -6,7° C a 46° C) [43].

Durante a preparação e aplicação de resina torna-se de extrema importância a utilização de uma adequada proporção de compostos, na respetiva faixa térmica, fornecida pelo fabricante a fim de garantir a trabalhabilidade da mesma para uma correta colagem das aduelas.

Antes da aplicação da resina é necessário remover qualquer tipo de sujidade das faces a colar. As manchas de óleo, poeira ou pasta de cimento. Materiais desintegradores ou contaminantes podem por em causa a adesão entre aduelas que, por sua vez poderá provocar graves danos estruturais.

Geralmente a mistura é feita em baldes com as medidas dos compostos previamente estabelecidas. Para a execução da mistura, por norma, junta-se o endurecedor à resina. De seguida procede-se à mistura do compósito que frequentemente dura, no mínimo durante três minutos a baixa velocidade (400-600 rpm) com o auxílio de um equipamento giratório munido de um misturador adequado para o fim. O material que se deposita nas paredes do balde deve ser “raspado” para o fundo durante o processo de modo a garantir homogeneidade do produto final. Quando o produto ganha uma cor cinzenta e uniforme dá-se por terminado o processo de mistura [6]. Em alguns casos o endurecedor poderá possuir uma cor diferente do da resina de modo a facilitar identificação de conclusão do processo da mistura.

Por norma os requisitos de aplicação variam de caso para caso e devem ser descritos no caderno de encargos do projeto.

A aplicação da resina, na maioria dos casos é feita manualmente mas com uso obrigatório de equipamentos de proteção como por exemplo luvas de borracha. Na Figura 4.11. apresenta-se uma imagem de aplicação da resina epóxi antes da colagem de aduelas.



Fig. 4.11. – Aplicação da resina epóxi [43].

É de extrema importância considerar no planejamento de trabalhos a mão-de-obra e o tempo necessários para uma correta aplicação da resina antes que comece a ganhar presa. Quanto à espessura, essa deve ser aproximadamente de 1/60 polegadas (aproximadamente 0,43 mm) em ambas as faces de colagem [43]. Normalmente, essa quantidade é suficiente para garantir uma lubrificação eficaz sem grandes desperdícios. Posteriormente procede-se a aplicação do pré-esforço temporário que não deverá ser inferior a 0,2 MPa, ainda que importa garantir a sua aplicação antes que o tempo de abertura de resina epóxi expira [39].

Após a união das aduelas e a aplicação de esforço de compressão, a resina em excesso será expulsa pelo perímetro exterior de colagem, e de seguida deverá ser retirada, visto que após ganhar a presa o processo de remoção será muito mais custoso. Em zonas sensíveis, debaixo do tabuleiro será necessário colocar proteção adequada para que os excessos de resina não contaminem o meio ambiente.

Para além dos cuidados mencionados acima, destaca-se a importância de verificação de adaptabilidade de ligações das aduelas e, caso necessário proceder ao reparo estrutural, que por sua vez deverá ser sempre fiscalizado pela entidade responsável.

4.2.6. REGULAMENTAÇÃO APLICÁVEL AOS REQUISITOS DE DESEMPENHO

A fim de se atender a todos os requisitos mencionados no subcapítulo anterior, e tendo por base a consciência da diversidade de condicionantes e exigências de cada obra, como por exemplo, a incerteza relativamente as taxas de produção, condições climatéricas, níveis de humidade e métodos de aplicação entre outros, o ligante epóxi deve ser cuidadosamente selecionado de caso para caso, com as características e os métodos de aplicação bem especificados.

Ao longo dos anos foram elaborados inúmeros ensaios e testes para uniformizar os tipos de resinas, abrangendo o maior número possível de casos práticos.

Pela primeira vez a metodologia de ensaios foi publicada em 1978 pela Federação Internacional de Betão (*Fédération internationale du béton*, FIB) e por “*American Association of State Highway and Transportation Officials*” (AASHTO). Estes documentos descrevem diferentes tipos de ensaios a executar, bem como um conjunto de requisitos de desempenho para os adesivos epóxi.

Embora os documentos tenham sido lançados como um conjunto de recomendações e orientações, nos dias de hoje são considerados obrigatórios e indispensáveis por todos os engenheiros, projetistas e empreiteiros ligados à construção de pontes com aduelas pré-fabricadas [43].

4.3. CASO DE ESTUDO – PONTE LAGUNA

4.3.1. SIMULAÇÃO DO PROCESSO CONSTRUTIVO

4.3.1.1. Descrição da Obra a Executar

De modo a otimizar o processo construtivo e escolher o modo adequado de colocação de aduelas, é fundamental perceber o impacto causado pela construção, bem como as condicionantes e as imposições relacionadas com o meio envolvente, impostas pelo dono de obra e os meios disponíveis para a construção.

A obra escolhida para a elaboração da análise de impacto de variação do peso de aduelas nas tensões geradas durante o processo construtivo foi a Ponte sobre o Canal das Laranjeiras localizada no Brasil. As características da obra apresentam-se no Quadro 5.

O equipamento construtivo utilizado durante a construção da ponte foi a Lançadeira LG50. As características da mesma serão oportunamente explicadas ao longo do desenvolvimento do presente capítulo.

Quadro 5 - Características Principais – Ponte sobre o Canal das Laranjeiras.

Número de vãos	52
Número de vãos com utilização LG50	43
Raio mínimo de curvatura em planta	2000 m
Raio mínimo de curvatura em alçado	16000 m
Inclinação longitudinal máxima	3,67%
Inclinação longitudinal mínima	0,13%
Inclinação transversal	2,0%
Número aduelas por vão (Figura 4.12.)	14
Peso aduela normal	79,2 tf
Peso aduelas de extremidade	70 tf
	85,7 tf
Vão corrente da ponte	50 m
Comprimento aduela normal	3,65 m
Comprimento aduelas de extremidade	1,60 m
	2,35 m
Altura da aduela	3,2 m

Largura das aduelas	9,4 m
Espessura da transversina	800 mm
Dimensões em planta do capitel do pilar (Comprimento x Largura)	6,6x3 m
	6,5x3 m
	5,1x3 m
Altura plinto + aparelho de apoio mínima	835 mm
Força de protensão temporária por interface	240 tf

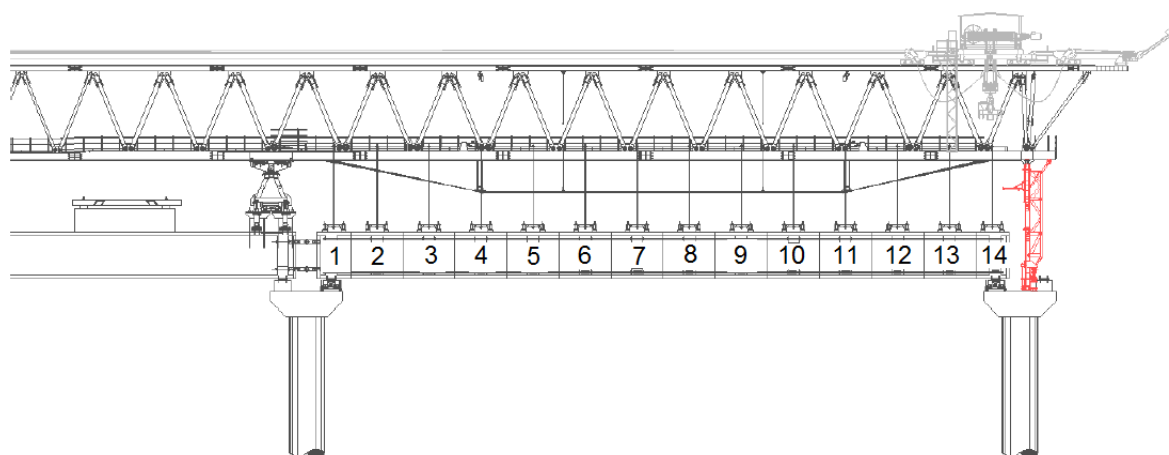


Fig. 4.12. – Representação esquemática de um vão.

4.3.1.2. Descrição do Processo Construtivo

No caso de estudo é aplicado o método construtivo “tramo a tramo” que, como descrito no 2.2. consiste na construção de um troço de tabuleiro completo entre pilares (vão ou tramo). Segundo a descrição do processo construtivo elaborado pela BERD, no caso da ponte sobre o Canal das Laranjeiras, o tramo a construir é isostático, sendo apenas mobilizada, durante a construção, uma ligação ao tabuleiro anterior com o objetivo de fixar a posição planimétrica da primeira aduela a montar.

A construção “tramo a tramo” (Figura 4.13.) tem por base a montagem de troços de tabuleiro, ou aduelas, com recurso à ponte rolante. A união de duas aduelas pressupõe, no caso da ponte sobre o Canal das Laranjeiras, a aplicação prévia de uma resina epóxi nas juntas para garantir a colagem das aduelas. O posicionamento da aduela inclui ainda a aplicação de pré-esforço temporário entre as aduelas de modo a garantir o encaixe perfeito e colagem adequada.

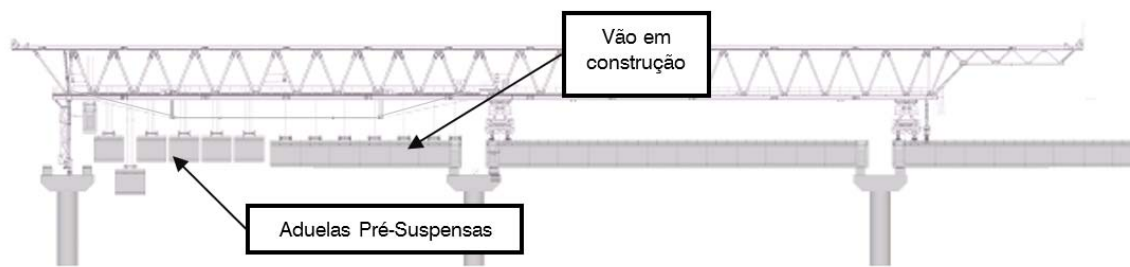


Fig. 4.13. - LG50 – Método “tramo a tramo”.

A suspensão gradual de todas as aduelas na posição final antecede a aplicação de pré-esforço final e o procedimento de ajuste geométrico (planimétrico e altimétrico) do tabuleiro construído. Apenas após a descarga da Lançadeira LG50 e aplicação do pré-esforço total do tabuleiro se realiza a operação de avanço e preparação da máquina para a construção de um novo tramo.

A admissão das aduelas é executada a partir da cota inferior: as aduelas são elevadas pela ponte rolante a partir de cota inferior (solo/água) encontrando-se diretamente abaixo do troço de tabuleiro a construir.

O posicionamento das aduelas é executado pela ponte rolante que se desloca sobre as cordas superiores das vigas principais da Lançadeira LG50. Note-se que este equipamento permite o transporte das aduelas com peso até 90 ton desde a zona de admissão até à sua posição final.

A locomoção da Lançadeira LG50 faz-se com recurso à ponte rolante. Nesta fase a ponte rolante encontra-se fixa ao pórtico de apoio traseiro e, estando o cabo de locomoção fixo à lançadeira, é promovido o movimento da carga móvel por acionamento de cabrestantes elétricos que realizam a movimentação do cabo de aço [11].

Etapas executivas em obra:

- Montagem da treliça da Lançadeira LG50 na posição definida para construção de vão;
- Suspensão das 7 aduelas (de 8 a 14);
- Posicionamento do contrapeso de avanço da treliça;
- Suspensão, posicionamento e colagem de aduelas de 1 a 7:
 - Atuação de OPS com incremento de curso de 35 mm durante o posicionamento de aduelas de 3 a 7;
- Posicionamento e colagem de aduelas de 8 a 14:
 - Atuação de OPS com incremento de curso de 5,85 mm durante o posicionamento de aduelas de 10 a 13 e de 3,35 mm durante o posicionamento de aduela 14;
- Aplicação de pré-esforço final e o procedimento de ajuste geométrico;
- Descarga e avanço da Lançadeira LG50.

4.3.1.3. Descrição do Equipamento Construtivo

A Lançadeira LG50 (Figura 4.14.) foi concebida para utilização na construção de tabuleiros de pontes e viadutos, com vão de 50 metros, através da metodologia “tramo a tramo”.



Fig. 4.14. – Modelo tridimensional da treliça Lançadeira LG50.

A estrutura resistente da Lançadeira LG50 (Figura 4.15.) é formada por duas vigas principais treliçadas de secção transversal triangular e por um conjunto de cabos de pré-esforço ativamente controlados por um sistema de pré-esforço orgânico (OPS que será descrito mais detalhadamente em 4.2.1.4.) durante a fase de posicionamento de aduelas.

As vigas principais apoiam-se sobre pórticos de apoio e sobre patas (traseira e dianteira) consoante a fase do ciclo de trabalho. Os pórticos de apoio da Lançadeira LG50 são montados de forma autónoma, com auxílio de uma ponte rolante que os transporta para a posição de avanço. A ponte rolante é utilizada ainda para admissão, transporte e posicionamento preciso das aduelas do tabuleiro em construção, e também para locomoção da Lançadeira LG50 [11].

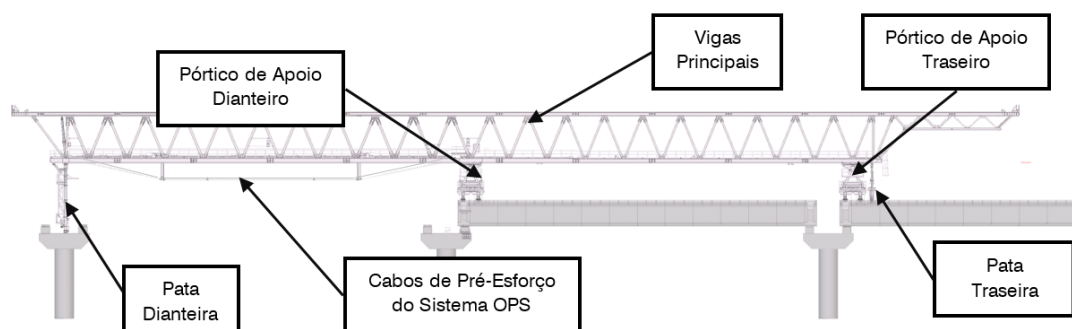


Fig. 4.15. - Alçado da Lançadeira LG50 – Identificação dos componentes principais.

4.3.1.4. Sistema OPS

O sistema OPS (Figura 4.16.) consiste num pré-esforço exterior ligado ao equipamento construtivo que atua conforme surge a necessidade de atenuar as deformações impostas durante o processo construtivo, minimizando, deste modo os esforços no equipamento construtivo e nas juntas das aduelas pré-fabricadas e os desvios geométricos do tabuleiro.

O sistema OPS poderá traduzir-se em pré-esforço orgânico composto por cabos de pré-esforço não aderente, as respetivas ancoragens, ativa numa das extremidades e passiva na outra, sensores de deformação e as ligações necessárias associadas.

Uma das principais vantagens de utilização dos equipamentos construtivos dotados de um sistema OPS é o facto de haver o controlo das deformações durante a fase construtiva que por sua vez é fulcral tendo em conta a dificuldade do controlo pormenorizado em obra. Esse facto traduz-se num bom desempenho da estrutura ao longo da vida útil e redução de custos na obra no seu todo que pode ser muito expressiva.

A atuação do sistema OPS, no caso concreto da construção da Ponte Laguna, começa durante o posicionamento da terceira aduela com um incremento de curso de 35 mm e é consecutivamente aumentado durante a colocação das restantes com a exceção das aduelas oito e nove. Desse modo o sistema OPS auto ajusta-se conforme a necessidade do controlo de deformação (variação de flecha total do equipamento construtivo). Note-se que as primeiras duas aduelas transferem o esforço diretamente para o apoio (pilar), sendo a distância reduzida – a transferência de carga é direta.

Antes da aplicação do pré-esforço longitudinal todas as aduelas são suportadas pela lançadeira, daí ser fundamental o funcionamento do OPS, visto que esse garante que as deformações do equipamento construtivo não sejam de tal ordem de grandeza que possam causar efeitos irreversíveis nas juntas entre aduelas, tendo em conta que nessa fase ainda não se encontram auto-portáveis.

O sistema OPS, patenteado a nível mundial e de uso exclusivo da BERD, inclui sistemas de segurança tais como sistemas de monitorização com avisos e alarmes.

Durante a fase de avanço os cabos OPS não se encontram ativos e a estrutura comporta-se como uma estrutura treliçada simples.



Fig. 4.16. – Sistema OPS.

4.3.1.5. Interação de Efeitos e Transferência de Carga

Para a análise de esforços durante o processo construtivo, para além dos esforços causados pelo equipamento construtivo e pelo peso próprio dos materiais constituintes da ponte, é fundamental a avaliação da interação entre eles.

Destaca-se a importância de consideração da rigidez da ponte e do equipamento construtivo tendo em conta o facto de serem constituídos por materiais com características bastante diferentes: a ponte construída com aduelas em betão e o equipamento construtivo em aço. O incremento de rigidez do tabuleiro durante a construção do vão devido ao pré-esforço instalado, torna o mais suscetível a ações aplicadas na lançadeira. O aparecimento de tensões nas interfaces é inevitável e é justificado pela ligação entre as duas estruturas: a lançadeira e o tabuleiro.

Dito isso torna-se fulcral a consideração de ações preventivas de modo a atenuar os efeitos de transferência de carga.

No caso da ponte sobre o Canal das Laranjeiras estas ações passaram pelo controlo de tensões instaladas nos cilindros hidráulicos: O operador tem dois pares de cilindros hidráulicos em obra. Durante a montagem da aduela n um deles encontra-se montado nas barras da aduela n e o outro está em carga nas barras da aduela $n-1$, montada previamente. O processo em obra traduz-se no controlo dos valores de pressão limite (definidos através do procedimento de cálculo) nos cilindros hidráulicos montados na aduela $n-1$, de modo a controlar os esforços gerados durante a transferência de carga do cabo de guincho para as barras de suspensão (com os respetivos cilindros hidráulicos) da aduela n . O processo de transferência de carga, por sua vez foi faseado e definido por duas etapas: descida do cabo do guincho e subida dos cilindros hidráulicos da aduela n . No final do processo de transferência de carga o operador tinha de garantir que a pressão dos cilindros do alinhamento n correspondesse à pressão indicativa do peso da respetiva aduela. Caso não existam erros subjacentes a variações de peso próprio das aduelas ou inerentes ao equipamento hidráulico, também a pressão dos cilindros do alinhamento $n-1$ terá correspondência ao seu peso próprio da aduela $n-1$, sendo isto indicativo de tensão nula na interface entre as aduelas n e $n-1$.

Um outro aspeto para melhorar o desempenho do equipamento construtivo poderá ser o tipo de aço. Um aço de elevada classe de resistência poderá ser utilizado pelo menos nos principais elementos do equipamento construtivo a fim de reduzir o peso próprio, resultando em menores reações durante a deslocação do equipamento entre os apoios, e diminuindo o esforço induzido na estrutura. Ainda que o facto de redução do peso próprio da lançadeira torna a mais deformável. Caso se trate de uma lançadeira sem o sistema OPS, quanto mais flexível for a lançadeira em comparação com o tabuleiro, então o esforço tende cada vez mais a passar nas juntas entre aduelas.

Um deficiente controlo de transferência de carga poderá por em causa a qualidade das juntas executadas, induzindo uma tensão de tal ordem que as barras de pré-esforço temporário não consigam garantir a compressão mínima exigida nas juntas e, por sua vez comprometam gravemente o desempenho da resina epóxi ou, no limite, poderá correr-se o risco de transferência brusca do peso da aduela para o tabuleiro.

4.3.2. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

4.3.2.1. Modelo de Cálculo ROBOT

De modo a simular o processo construtivo recorreu-se ao programa de cálculo automático ROBOT.

Foi elaborado pela BERD um modelo de lançadeira em estudo com as respetivas características físicas e mecânicas (Figura 4.17.). A obtenção de esforços inerentes ao método construtivo requeria a

modelação de duas componentes: o procedimento de posicionamento de aduelas com a respetiva alteração dos pontos de aplicação da carga, e o processo de suspensão com a respetiva transferência de carga. O procedimento de posicionamento de cada aduela sobrepunha as etapas inerentes ao posicionamento de aduela não pré-suspensa; reposicionamento de aduelas previamente suspensas; reposicionamento de ponte rolante e atuação do sistema OPS. Quanto o processo de suspensão de aduelas, este traduzia dois efeitos subjacentes à montagem de cada aduela: carregamento de barras de suspensão através de cilindros hidráulicos e descida do cabo do guincho da ponte rolante.

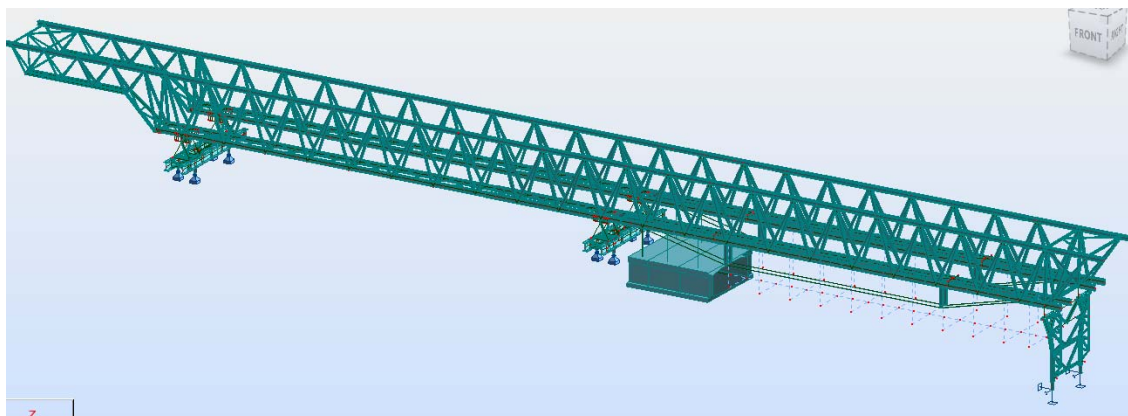


Fig. 4.17. - Modelo de lançadeira em estudo (modelação ROBOT).

A modelação do procedimento de posicionamento das aduelas consistiu na aplicação consecutiva do peso de aduelas na lançadeira (Figura 4.18.). Destaca-se que a atuação do OPS também foi tida em conta, sendo modelado o sistema de cabos ligado à lançadeira. Deste modo foi possível obter os esforços e deslocamentos do tabuleiro inerentes a todo o processo de posicionamento de aduelas.

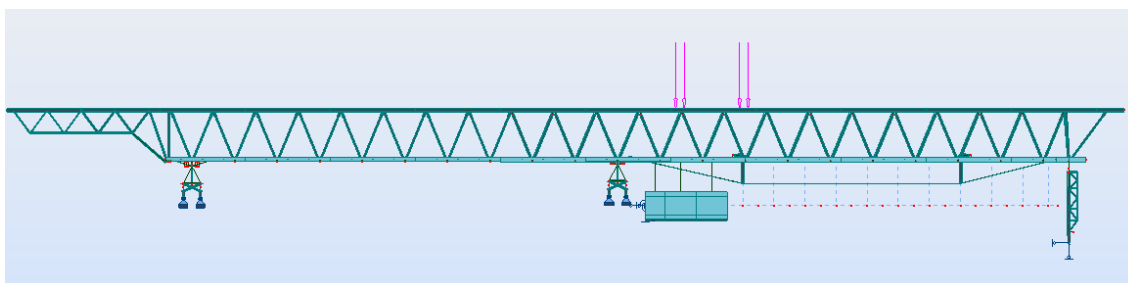


Fig. 4.18. - Representação da aplicação do peso de aduelas na lançadeira.

Na Figura 4.19. representa-se o efeito de reposicionamento de ponte rolante. A materialização dos efeitos inerentes à atuação do OPS foi elaborada induzindo um incremento de curso no modelo de cabos (Figura 4.20.).

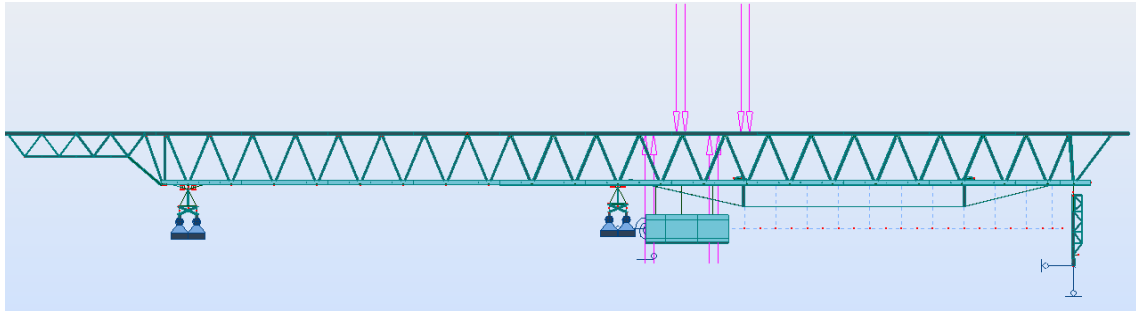


Fig. 4.19. – Representação do efeito de reposicionamento da ponte rolante.

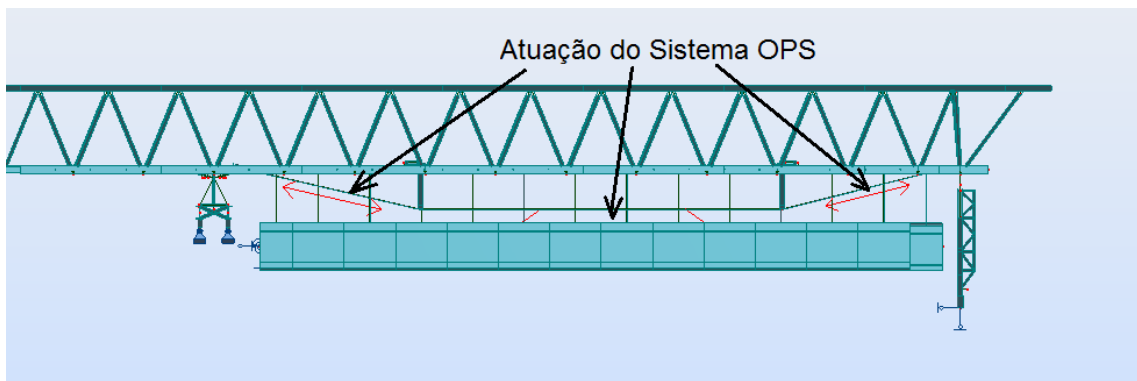


Fig. 4.20. – Representação da atuação do sistema OPS.

Quanto ao processo de suspensão, o modelo inclui materialização da ponte rolante com o respectivo cabo do guincho e ainda as barras de suspensão das aduelas, o que possibilita, através de uma solicitação de encurtamento/alongamento de barras, a modelação do procedimento de transferência de carga, traduzindo a montagem de cada aduela (Figura 4.21.).

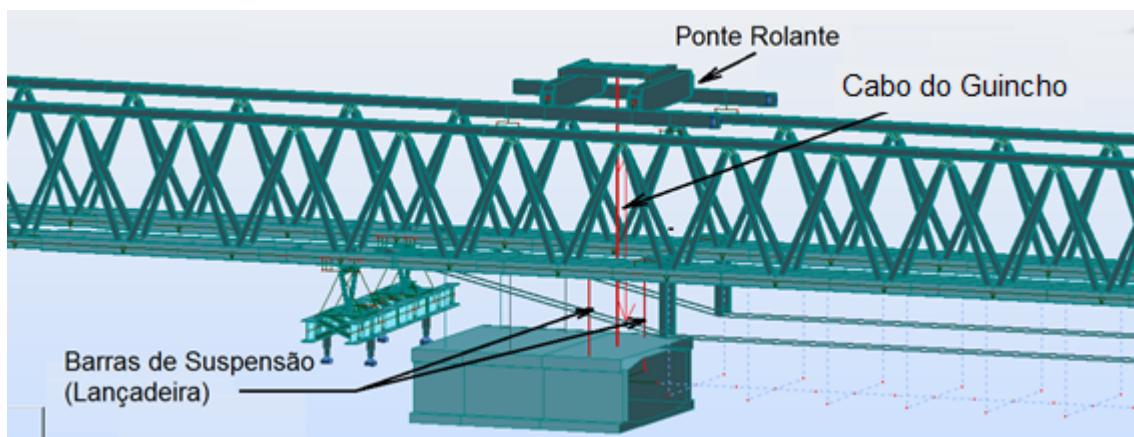


Fig. 4.21. – Representação da ponte rolante com o respectivo cabo do guincho.

4.3.2.2. Princípios Associados ao Método Construtivo

O objetivo do estudo apresentado foi a avaliação de tensões nas juntas entre aduelas, sendo que a salvaguarda destes valores, durante o processo construtivo, é um dos fatores fundamentais para um eficiente processamento de cura de resina epóxi, que posteriormente influencia o seu desempenho.

Um dos principais fatores que se reflete tanto nas sobrecargas de construção como na deformação do equipamento construtivo, ou na possibilidade de erro humano, é o peso das aduelas. Fator esse que muitas vezes poderá ter associado um desvio imprevisto e causar um incremento de tensões. Procurou-se perceber se o desvio do peso próprio das aduelas se traduz num incremento de tensão nas juntas relevante para a segurança e comportamento estrutural.

A possibilidade de ocorrência de desvio no peso próprio das aduelas foi tida em conta, tanto durante a avaliação dos esforços inerentes ao procedimento de posicionamento das aduelas, como durante o processo de suspensão com respetiva transferência de carga.

4.3.2.3. Avaliação de Dados

Todo o procedimento de cálculo de tensões nas interfaces de aduelas foi elaborado com recurso ao programa computacional EXCEL. Os resultados (esforços e deformações) foram exportados do programa de cálculo automático ROBOT, sendo processados em seguida com base no princípio de sobreposição de efeitos.

No que diz respeito à avaliação do procedimento de posicionamento de aduelas foi considerada a atuação do OPS durante o posicionamento de aduelas de 3 a 7 inclusive (aduelas não pré-suspensas), com incremento de curso de 35 mm em cada etapa. Esta operação procura traduzir aproximadamente um controlo de variação de flecha total, impedindo que a flecha do sistema OPS aumente durante o posicionamento de aduelas não pré-suspensas. No que diz respeito às aduelas pré-suspensas na lançadeira, o incremento de curso foi de 5,85 mm para o reposicionamento das aduelas 10 a 13 e de 3,35 mm para o reposicionamento da aduela 14. Neste contexto o sistema OPS permitiu uma diminuição nas tensões inerentes às duas componentes do processo.

O cálculo dos esforços inerentes ao posicionamento de cada aduela teve em conta o peso da lançadeira, os pesos das aduelas e a atuação do sistema OPS. De seguida apresenta-se a explicação detalhada do procedimento de cálculo:

- Deformação:

A deformação da primeira interface foi considerada nula visto tratar-se do posicionamento da primeira aduela, apoiada no hidráulico traseiro de compressão geométrica. Para o cálculo das restantes deformações procedeu-se à soma dos deslocamentos derivados do posicionamento da aduela anterior, do peso da aduela a posicionar, da atuação do OPS e da alteração da posição do peso próprio da ponte rolante.

- Esforço gerado nas barras de suspensão de aduelas, esforço transversal e momento fletor:

O cálculo do esforço gerado nas barras de suspensão, do esforço transversal e do momento fletor consistiu na soma do esforço causado pelo posicionamento da aduela anterior, peso da aduela a posicionar, atuação do OPS e alteração da posição do peso próprio da ponte rolante (todos divididos por duas barras de suspensão), ao esforço na mesma barra durante o posicionamento da aduela anterior. Refere-se também o facto que para cada uma nova aduela a posicionar, o esforço nas respetivas barras de suspensão foi apenas devido ao peso próprio da aduela.

A principal razão da determinação do esforço gerado nas barras de suspensão consistiu na necessidade de controlo do peso suspenso, de modo a entender a percentagem do peso que foi transferido através das interfaces do tabuleiro.

Os resultados dos momentos fletores calculados permitem a obtenção das tensões totais nas fibras superior e inferior nas interfaces geradas pelo processo construtivo.

Para a determinação dos esforços nas interfaces devido ao procedimento de suspensão foi elaborado um processo iterativo que consistia em duas etapas: a primeira correspondia à subida (colocação em carga) de cilindros hidráulicos das barras de suspensão, e a segunda – à descida do cabo do guincho da ponte rolante que transportava a aduela a posicionar. Todo o processo teve cinco a seis fases com alteração das etapas descritas (seis das quais correspondiam a subida de cilindros hidráulicos e cinco correspondentes à descida do cabo do guincho da ponte rolante). Importa referir que a opção de divisão do processo por etapas teve como objetivo diminuir o esforço induzido ao tabuleiro já executado e, por sua vez, o acréscimo de tensões nas juntas, tendo em conta que qualquer uma destas duas solicitações exerce uma ação sobre o tabuleiro rígido suspenso. Posto isto, a descida do guincho da ponte rolante e consequente redução de tensão no respetivo cabo, não se traduz diretamente no mesmo aumento de força nas barras de suspensão da aduela, podendo passar para o tabuleiro uma certa percentagem do peso da aduela a montar. Esta percentagem, por sua vez, depende da rigidez do tabuleiro.

A última fase teve como objetivo garantir que a pressão nos cilindros hidráulicos da aduela anterior correspondessem ao peso da mesma, de modo a assegurar o suporte do peso total da aduela apenas pelas respetivas barras.

Os valores de *input* do processo de cálculo correspondem a uma dilatação da barra que simula o cabo do guincho da ponte rolante e um encurtamento das barras de suspensão dos cilindros hidráulicos, que foram calibrados de modo a garantir uma pressão limite nos cilindros hidráulicos da aduela anterior. Destaca-se o facto de todo o processo ser elaborado de modo a facilitar o controlo de tensões em obra, visto que os operadores têm que garantir apenas uma pressão especificada nos cilindros hidráulicos.

O processo de transferência de carga de aduelas deu-se por terminado quando o esforço na interface entre aduela n e $n-1$ era nulo e a pressão nos cilindros hidráulicos das barras da aduela anteriormente posicionada correspondia ao seu peso próprio, o que indicava que as aduelas n e $n-1$ estavam a ser suportadas pelas respetivas barras de suspensão.

De seguida procedeu-se ao cálculo dos esforços gerados em cada fase.

- Esforço gerado nas barras de suspensão de aduelas, esforço transversal e momento fletor:

O cálculo do esforço nas barras de suspensão e do esforço transversal consistiu na soma do efeito do esforço gerado nas barras pelo processo de transferência de carga, ao esforço da etapa anterior. Ainda que na primeira iteração o valor de partida era o peso próprio da aduela a posicionar.

Para a determinação dos momentos fletores totais inerentes ao procedimento de transferência de carga elaborou-se o cálculo para cada etapa. Este cálculo consistiu na soma do efeito do momento fletor gerado na etapa em questão ao momento da etapa anterior na respetiva interface. De seguida retiraram-se os momentos máximos positivos e negativos de todo o processo. Note-se que os momentos positivos dizem respeito à subida de cilindros hidráulicos das barras de suspensão e os negativos à descida do guincho da ponte rolante.

4.3.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a obtenção dos esforços inerentes ao processo construtivo do tabuleiro procedeu-se à condensação de resultados de modo a analisar os respetivos efeitos.

Os valores das tensões resultantes do procedimento de suspensão e do posicionamento de aduelas (Efeito OPS) com o peso próprio previsto em projeto apresentam-se no Quadro 6, possibilitando a perceção da ordem de grandeza dos esforços desenvolvidos ao longo do processo construtivo.

Quadro 6 – Tensões resultantes do Procedimento de Suspensão + Efeito OPS (kPa).

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	202	200											
P4	206	191	199										
P5	207	182	184	197									
P6	204	170	166	173	192								
P7	211	185	188	186	179	193							
P8	212	186	188	181	167	169	192						
P9	212	188	190	182	164	158	167	191					
P10	215	198	204	195	169	152	148	157	186				
P11	221	221	240	239	215	193	177	165	167	189			
P12	227	243	275	281	260	235	211	186	169	169	191		
P13	233	266	312	326	307	281	250	214	181	161	162	187	
P14	238	285	342	367	354	332	303	264	225	192	173	172	195

Na Figura 4.22. representa-se o desenvolvimento das tensões ao longo do procedimento de execução do vão para a fibra inferior das interfaces. A tensão mínima estabelecida de compressão nas juntas entre aduelas foi de 150 kPa, de modo a garantir uma adequada cura da resina epóxi. Destaca-se que durante a montagem de aduela 10, a tensão de compressão na interface 7/8 não cumpriu o limite estabelecido, ainda que se trate de um valor bastante próximo.

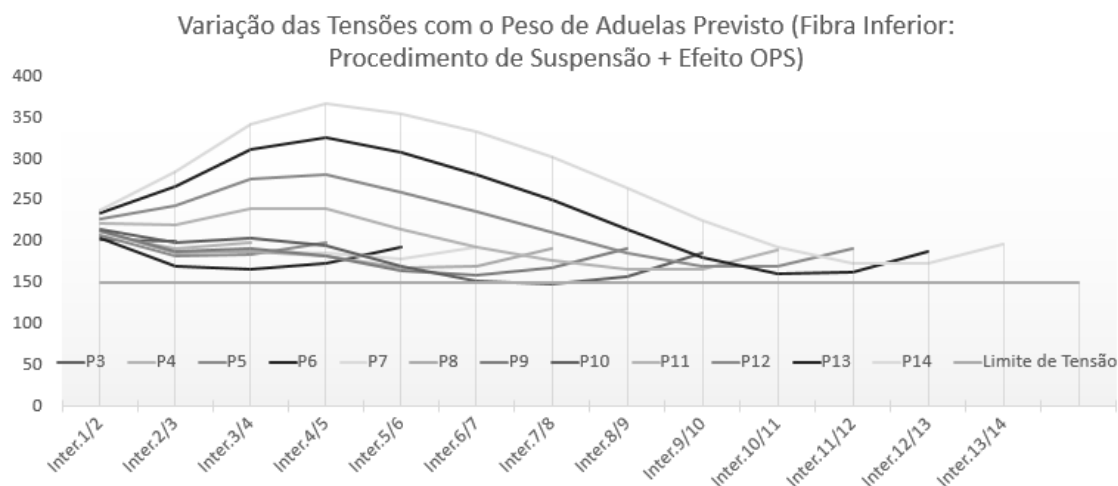


Fig. 4.22. - Desenvolvimento das tensões ao longo do procedimento de execução do vão (kPa).

Foram elaboradas as tabelas separadas para a avaliação de momentos fletores e tensões nas interfaces, que resultam do procedimento de suspensão das aduelas e do processo de transferência de carga, tanto para o peso próprio das aduelas previsto em projeto (Anexo A), como para os pesos alterados pelo desvio positivo (Anexo B) e negativo (Anexo C) de 5%.

De seguida procedeu-se à soma dos efeitos, ainda que sempre com a coerência dos respetivos sinais.

Todos os gráficos do seu desenvolvimento de momentos fletores e tensões nas interfaces ao longo da execução do tabuleiro encontram-se no Anexo D.

4.3.3.1. Secção Transversal

De modo a determinar as tensões nas interfaces das aduelas foi necessário elaborar o estudo da sua secção transversal, visto que os resultados finais do procedimento de cálculo se traduziam em esforços (momentos fletores).

O pré-esforço temporário de união das aduelas foi de 240 ton, distribuído pelos cinco blocos de ancoragem: três no banzo superior e dois no banzo inferior, com 120 ton em cada banzo. O esforço de compressão teve valores diferentes, visto se tratar das diferentes distâncias de atuação do pré-esforço em relação ao eixo neutro da secção (1640 mm para o banzo superior e 1210 mm para o banzo inferior).

A geometria da secção transversal, bem como os pontos de aplicação do pré-esforço temporário de união das aduelas com os respetivos valores estão representados na Figura 4.23.

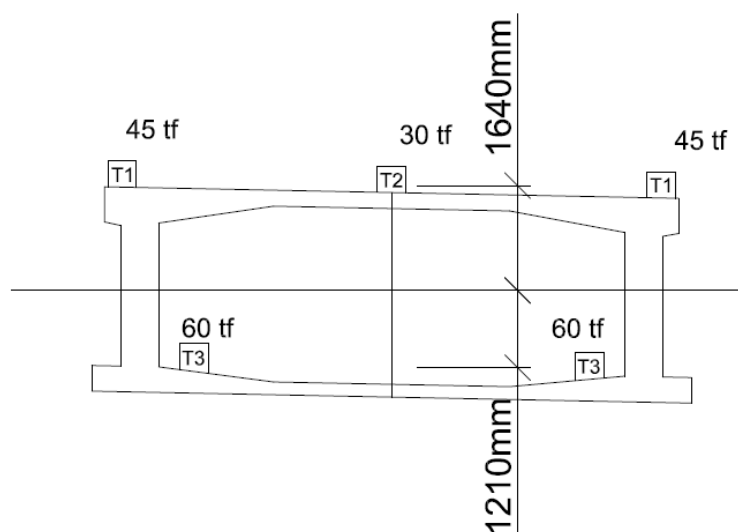


Fig. 4.23. – Seção transversal das aduelas em análise.

O cálculo das tensões na fibra superior e inferior da seção ($\sigma_{sup,inf}$) consistiu na soma da força de compressão (F_{PT}), dividida pela área da seção (A_{st}), com a multiplicação do momento fletor (M_{PT}), dividido pela inércia (I_{cm}), com a respetiva distância à fibra em questão ($y_{sup,inf}$) (Equação 7).

$$\sigma_{sup,inf} = \frac{F_{PT}}{A_{st}} + \frac{M_{PT}}{I_{cm}} \times y_{sup,inf} \quad (7)$$

Os valores de tensões de compressão na fibra superior e inferior, derivadas da aplicação do pré-esforço temporário apresentam-se na Quadro 7:

Quadro 7 - Valores de tensões de compressão na fibra superior e inferior.

σ_{sup}	352 (kPa)
σ_{inf}	207 (kPa)

4.3.3.2. Momentos Fletores Resultantes do Procedimento de Posicionamento de Aduelas

Em termos absolutos, para um aumento de peso de 5% em relação ao previsto, apresentam-se os valores de variação de momentos fletores no Quadro 8, que correspondem à subtração de momentos gerados com a respetiva variação no peso próprio dos momentos gerados, com peso próprio previsto. Os sinais negativos indicam que os momentos, obtidos com a aplicação do desvio, são inferiores aos calculados sem ele. A variação máxima estimada ocorre na interface das aduelas 3 e 4 durante o posicionamento da aduela 14 (última a posicionar no vão em análise) e é de 44 kNm. Um valor que aparenta ser bastante reduzido, visto que representa uma variação de cerca de 4% no momento previsto.

Quadro 8 - Incremento do momento fletor nas interfaces para um aumento no peso das aduelas de 5%

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	4,4	0,0											
P4	8,6	0,4	0,0										
P5	10,8	5,0	2,4	0,0									
P6	11,3	13,5	10,2	-2,9	0,0								
P7	10,5	25,4	-23,5	-12,0	-3,0	0,0							
P8	10,0	27,1	-25,9	-14,7	-5,2	0,9	0,0						
P9	9,5	29,2	-28,9	-18,1	-8,4	3,4	1,0	0,0					
P10	8,9	-31,7	-32,5	-22,2	-12,4	-6,7	-3,2	-0,8	0,0				
P11	8,3	-34,5	-36,8	-27,2	-17,6	-11,6	-7,1	-3,0	-0,7	0,0			
P12	7,7	-36,7	-40,3	-31,6	-22,7	-17,0	-12,3	-7,6	-3,9	-1,1	0,0		
P13	7,4	-37,9	-42,2	-34,1	-25,6	-20,1	-15,4	-10,4	-6,1	-2,8	-0,7	0,0	
P14	7,2	-39,0	-43,9	-36,3	-28,3	-23,2	-18,7	-13,6	-9,0	-5,1	-2,0	-0,4	0,0

No caso do desvio no peso próprio das aduelas ser negativo, a variação absoluta de momentos (Quadro 9) fletores apresenta-se bastante semelhante ao do desvio positivo, e também com uma ordem de grandeza praticamente irrelevante para os valores dos momentos provocados pelo processo de posicionamento em análise. Poderá destacar-se facilmente o facto de existir uma alteração de valores de variação de momentos para o desvio positivo e negativo no peso das aduelas, apenas na interface 2/3, durante o posicionamento das aduelas 7, 8 e 9.

A existência de desvio no peso próprio das aduelas não tem grande impacto nas tensões geradas nas interfaces.

Quadro 9 - Incremento do momento fletor nas interfaces para uma diminuição no peso das aduelas de 5%.

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	4,4	0,0											
P4	8,6	0,4	0,0										
P5	10,8	5,0	2,4	0,0									
P6	11,3	13,5	10,2	-2,9	0,0								
P7	10,5	-0,9	-23,5	-12,0	-3,0	0,0							
P8	10,0	-3,5	-25,9	-14,7	-5,2	0,9	0,0						
P9	9,5	1,3	-28,9	-18,1	-8,4	3,4	1,0	0,0					
P10	8,9	-31,7	-32,5	-22,2	-12,4	-6,7	-3,2	-0,8	0,0				
P11	8,3	-34,5	-36,8	-27,2	-17,6	-11,6	-7,1	-3,0	-0,7	0,0			
P12	7,7	-36,7	-40,3	-31,6	-22,7	-17,0	-12,3	-7,6	-3,9	-1,1	0,0		
P13	7,4	-37,9	-42,2	-34,1	-25,6	-20,1	-15,4	-10,4	-6,1	-2,8	-0,7	0,0	
P14	7,2	-39,0	-43,9	-36,3	-28,3	-23,2	-18,7	-13,6	-9,0	-5,1	-2,0	-0,4	0,0

4.3.3.3. Momentos Fletores Resultantes do Procedimento de Transferência de Carga

No caso do cálculo de momentos para o procedimento de transferência de carga, esses foram divididos em positivos e negativos, tal como mencionado anteriormente. Deste modo procedeu-se à análise separada dos esforços que geraram incremento de tensões para a fibra superior e inferior da aduela.

Para o caso do desvio no peso próprio da aduela ser positivo, a variação dos momentos correspondente à análise de incremento de tensões para a fibra inferior (subida de cilindros hidráulicos), com os respetivos resultados apresentados no Quadro 10. Destaca-se o maior valor da variação de momentos na interface 9/10 durante o posicionamento da aduela 13, que corresponde ao aumento de solicitação de cerca de 12%.

Quadro 10 - Incremento do momento fletor nas interfaces para um aumento no peso das aduelas de 5% (Análise da Fibra Inferior).

	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	8,4	5,1											
P4	7,2	12,4	6,5										
P5	5,5	13,1	16,1	8,2									
P6	7,4	19,8	28,5	28,3	12,6								
P7	4,5	13,5	21,2	25,5	23,6	10,4							
P8	5,6	17,4	28,4	36,5	38,9	33,5	14,3						
P9	4,3	14,0	23,7	32,3	38,2	39,1	33,0	14,1					
P10	4,1	13,1	22,7	32,1	40,0	45,2	45,4	37,4	15,5				
P11	2,9	9,4	16,8	24,8	32,8	39,8	44,5	44,9	37,6	15,7			
P12	1,8	6,0	10,8	16,1	21,4	26,6	31,0	33,5	32,4	26,7	11,3		
P13	2,7	9,1	16,5	24,8	33,8	43,1	52,3	60,2	64,8	63,4	50,7	20,3	
P14	1,2	4,0	7,3	11,0	15,1	19,4	24,0	28,5	32,3	34,2	32,8	25,6	7,9

Analisando ainda a variação de esforços que geram incremento das tensões na fibra inferior, mas para um desvio de peso negativo (Quadro 11), destaca-se o facto de que a maior parte dos momentos obtidos com a aplicação do desvio são inferiores aos calculados sem ele, o que significa diminuição da sollicitação. Os valores das variações mais elevadas, correspondentes à interface 6/7 durante a transferência de carga da aduela 10 e a interface 10/11 durante a transferência de carga da aduela 13, representam uma variação de cerca de 3%. No primeiro caso esta variação é favorável visto que se traduz na diminuição de sollicitação, ou seja, aumento de tensão de compressão na fibra inferior da interface. Já no segundo, apresenta-se desfavorável, aumentando a sollicitação e consequentemente diminuindo a tensão de compressão na fibra inferior da interface.

Quadro 11 - Incremento do momento fletor nas interfaces para uma diminuição no peso das aduelas de 5% (Análise da Fibra Inferior).

	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	0,3	0,2											
P4	1,1	1,8	0,8										
P5	-0,2	-0,5	-0,1	0,3									
P6	-1,8	-5,2	-6,7	-4,9	-1,5								
P7	-0,1	0,1	0,2	0,7	1,4	0,9							
P8	0,0	0,2	0,3	0,3	0,1	0,5	0,6						
P9	-0,4	-0,9	-1,5	-2,0	-2,2	-2,3	-1,1	0,0					
P10	-1,5	-5,0	-8,7	-12,2	-15,0	-16,5	-15,5	-10,4	-3,3				
P11	-0,6	-2,1	-3,5	-4,6	-5,4	-5,8	-5,7	-4,6	-2,1	-0,3			
P12	-0,2	-0,7	-1,2	-1,7	-2,2	-2,7	-3,1	-3,4	-3,5	-2,2	-0,5		
P13	0,6	1,9	3,4	5,1	7,0	8,9	10,9	12,7	14,0	14,6	12,7	5,3	
P14	-0,1	-0,2	-0,5	-0,9	-1,4	-2,0	-2,6	-3,3	-3,8	-4,1	-3,6	-2,1	-0,4

No caso da análise de esforços derivados do procedimento de descida da ponte rolante (momento negativos), ou seja, relacionados com o incremento de tensão de tração na fibra superior, a variação de momentos em termos absolutos, para um desvio positivo no peso das aduelas, apresenta-se no Quadro 12. O máximo ocorre na interface das aduelas 7 e 8 durante o posicionamento da aduela 11 e corresponde a uma variação de solicitação de 21%.

Quadro 12 - Incremento do momento fletor nas interfaces para um aumento no peso das aduelas de 5% (Análise da Fibra Superior).

	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	8,0	5,0											
P4	5,6	9,2	4,8										
P5	2,6	6,1	7,0	3,2									
P6	3,6	9,5	14,1	14,8	6,9								
P7	5,3	15,1	23,4	27,3	23,7	9,9							
P8	3,7	11,2	18,3	23,7	25,6	21,4	8,7						
P9	3,5	10,8	18,2	24,7	29,1	29,9	24,1	9,5					
P10	2,4	7,6	13,1	18,5	23,2	26,4	26,9	22,9	9,8				
P11	3,4	11,1	19,5	28,0	35,9	42,3	45,8	44,3	34,3	13,3			
P12	1,6	5,4	9,7	14,3	19,1	23,6	27,4	29,7	29,0	22,9	9,0		
P13	1,0	2,9	5,2	7,9	10,8	13,9	17,1	20,1	22,3	24,0	21,7	9,2	
P14	1,1	3,5	6,4	9,8	13,8	18,1	22,7	27,1	30,9	32,8	31,0	23,0	6,8

Ainda no mesmo contexto, para um desvio no peso negativo, a máxima variação de solicitação ocorre na mesma interface e para o posicionamento da mesma aduela. No entanto, a variação em relação à solicitação do peso previsto é de 27%.

Quadro 13 - Incremento do momento fletor nas interfaces para uma diminuição no peso das aduelas de 5% (Análise da Fibra Superior).

	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	7,9	4,9											
P4	6,3	9,9	5,1										
P5	6,5	15,3	17,4	7,9									
P6	3,0	8,0	11,9	12,7	6,0								
P7	6,1	17,2	26,6	30,8	26,2	10,7							
P8	4,6	13,6	22,4	29,1	31,6	26,0	10,3						
P9	4,1	12,4	21,0	28,4	33,4	34,3	27,1	10,3					
P10	2,9	9,1	15,7	22,2	27,9	31,6	32,1	27,3	11,6				
P11	4,4	14,3	25,0	35,6	45,3	53,0	56,9	54,3	40,9	15,5			
P12	2,2	7,3	13,1	19,3	25,6	31,7	36,8	39,8	39,1	30,4	11,7		
P13	1,4	4,2	7,6	11,5	15,7	20,1	24,6	28,7	31,5	33,1	27,2	11,0	
P14	1,2	3,9	7,2	11,2	15,8	20,9	26,4	31,7	36,1	38,4	36,1	26,3	7,6

O procedimento de subida de cilindros hidráulicos é o mais prejudicial no que diz respeito ao controlo de tensões nas interfaces, visto tratar-se do incremento de tração na fibra inferior, a qual poderá ter tendência a não cumprir o esforço mínimo de compressão estabelecido para garantir uma adequada cura da resina epóxi. Isso deve-se ao facto da configuração da deformada, durante o procedimento construtivo, gerar tendencialmente trações na fibra inferior e compressões na fibra superior.

4.3.3.4. Atuação do Sistema OPS

Como já foi mencionado anteriormente, a atuação do sistema OPS foi considerada para o controlo de deformação do equipamento construtivo durante o posicionamento das aduelas 3 a 7 – aduelas não pré-suspensas. O incremento de curso foi de 35mm em cada etapa, de modo a garantir aproximadamente um controlo de deformação do equipamento construtivo, impedindo que a flecha do sistema OPS aumentasse durante o posicionamento de aduelas. Durante o posicionamento de aduelas pré-suspensas (Figura 4.24.), o incremento de curso foi bastante inferior, visto que procurou-se apenas garantir o controlo de tensões nas interfaces das aduelas do tabuleiro. Os valores do incremento de curso para as aduelas pré-suspensas foram calibrados de modo a garantir que as tensões finais do procedimento construtivo estivessem no limite estabelecido. Estes incrementos correspondiam a 5,85 mm durante o posicionamento das aduelas de 10 a 13 e a 3,35 mm durante o posicionamento de aduela 14.

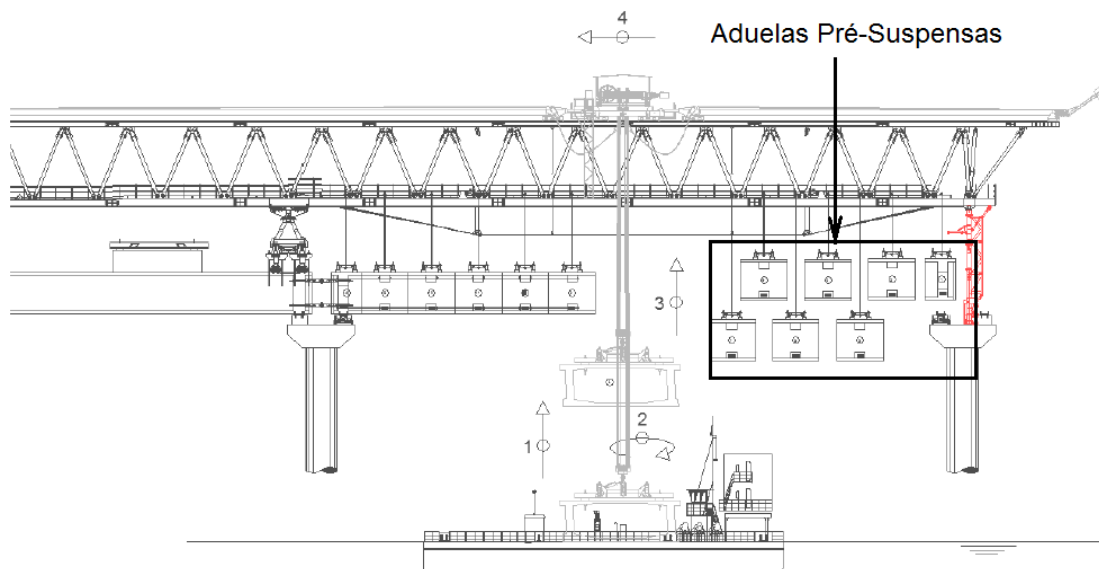


Fig. 4.24. – Representação esquemática de pré-suspensão de aduelas.

De modo a entender a influência da ação do OPS com diferentes incrementos de curso, isolou-se o efeito do OPS nas tensões das interfaces. Na Figura 4.25. representa-se o desenvolvimento de tensões “Com Atuação do OPS” durante todo o processo construtivo, “Sem Atuação do OPS” durante o reposicionamento de aduelas pré-suspensas (de 10 a 14) e “Sem Atuação do OPS*” durante todo o processo construtivo. Destaca-se que os incrementos de curso durante o reposicionamento de aduelas pré-suspensas tiveram grande influência no controlo de tensões nas interfaces do tabuleiro, permitindo afirmar que é possível a utilização do sistema OPS para o controlo destas tensões.

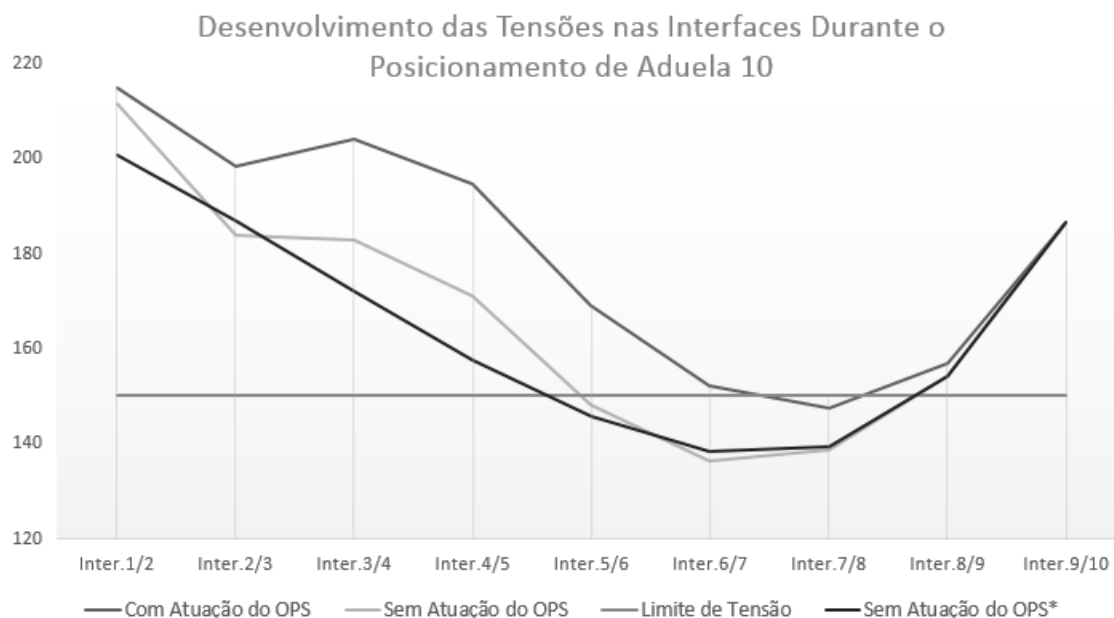


Fig. 4.25. – Desenvolvimento das tensões nas interfaces durante o posicionamento de aduela 10.

Com o ajuste do incremento de curso durante o reposicionamento das aduelas pré-suspensas é possível cumprir limitação de tensão mínima de compressão nas interfaces mesmo com a variação no peso próprio das aduelas. Para cumprir o limite mínimo de compressão no caso em estudo foi utilizado o incremento de curso de 12 mm durante o posicionamento de aduela 10, e deste modo a tensão de compressão obtida na interface 7/8 foi aproximadamente de 150,88 kPa (Figura 4.26.).

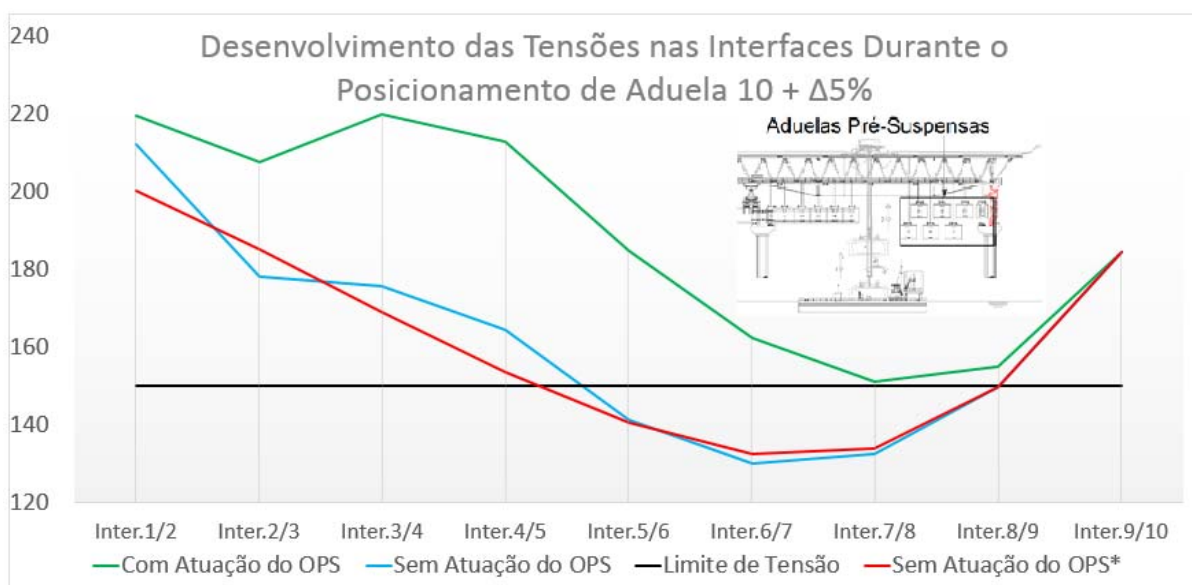


Fig. 4.26. – Desenvolvimento das tensões nas interfaces durante o posicionamento de aduela 10 com desvio de + 5% no peso próprio de aduelas.

4.3.3.5. Tensões Finais

O cálculo de tensões finais, derivadas do procedimento construtivo, elaborou-se tanto para a fibra superior, como para a inferior. Em primeiro lugar procedeu-se à soma de momentos fletores com os respetivos sinais e, de seguida, aplicou-se a Equação (7) (4.3.3.1.) para determinação das tensões geradas. Posteriormente, essas tensões foram somadas à tensão de compressão induzida pelas barras de pré-esforço temporário, apresentada no Quadro 7.

De modo a compreender a influência da alteração do peso próprio das aduelas nas tensões das interfaces procedeu-se a determinação do seu incremento para o caso de aumento ou diminuição do peso (Quadros 14, 15, 16, 17).

Quadro 14 – Incremento de tensões nas interfaces para um aumento no peso das aduelas de 5% (Fibra Inferior).

σ inf (kPa)	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	0,5	0,6											
P4	-0,2	1,6	0,8										
P5	-0,7	2,3	2,3	1,0									
P6	-0,5	4,2	4,9	3,9	1,6								
P7	-0,8	4,9	5,6	4,7	3,3	1,3							
P8	-0,6	5,6	6,8	6,4	5,5	4,3	1,8						
P9	-0,6	5,4	6,6	6,3	5,9	5,4	4,3	1,8					
P10	-0,6	5,6	7,0	6,8	6,6	6,5	6,1	4,8	1,9				
P11	-0,7	5,5	6,8	6,5	6,3	6,5	6,5	6,0	4,8	2,0			
P12	-0,7	5,4	6,4	6,0	5,6	5,5	5,4	5,2	4,6	3,5	1,4		
P13	-0,6	5,9	7,4	7,4	7,5	8,0	8,5	8,9	8,9	8,3	6,5	2,6	
P14	-0,8	5,4	6,4	6,0	5,5	5,4	5,4	5,3	5,2	4,9	4,4	3,3	1,0

Quadro 15 - Incremento de tensões nas interfaces para um aumento no peso das aduelas de 5% (Fibra Superior).

σ sup (kPa)	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	-0,4	-0,6											
P4	0,3	-1,1	-0,6										
P5	0,9	-1,3	-1,1	-0,4									
P6	0,9	-2,7	-2,8	-2,0	-0,8								
P7	0,6	-4,7	-5,4	-4,6	-3,1	-1,1							
P8	0,7	-4,4	-5,1	-4,4	-3,6	-2,6	-1,0						
P9	0,7	-4,6	-5,5	-5,0	-4,4	-3,9	-2,9	-1,1					
P10	0,8	-4,5	-5,3	-4,7	-4,1	-3,8	-3,5	-2,7	-1,1				
P11	0,6	-5,3	-6,5	-6,4	-6,2	-6,2	-6,1	-5,5	-4,0	-1,5			
P12	0,7	-4,9	-5,8	-5,3	-4,8	-4,7	-4,6	-4,3	-3,8	-2,8	-1,0		
P13	0,8	-4,7	-5,5	-4,9	-4,2	-3,9	-3,8	-3,5	-3,3	-3,1	-2,6	-1,1	
P14	0,7	-4,9	-5,8	-5,4	-4,9	-4,8	-4,8	-4,7	-4,6	-4,4	-3,8	-2,7	-0,8

Quadro 16 - Incremento de tensões nas interfaces para uma diminuição no peso das aduelas de 5% (Fibra Inferior).

σ inf (kPa)	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	0,6	0,0											
P4	1,2	0,2	0,1										
P5	1,3	-0,7	-0,3	0,0									
P6	1,2	-2,4	-2,1	-1,0	-0,2								
P7	1,3	-3,2	-2,9	-1,4	-0,2	0,1							
P8	1,3	-3,4	-3,2	-1,8	-0,6	0,0	0,1						
P9	1,1	-3,8	-3,8	-2,5	-1,3	-0,7	-0,3	0,0					
P10	0,9	-4,6	-5,2	-4,3	-3,5	-2,9	-2,3	-1,4	-0,4				
P11	1,0	-4,6	-5,1	-4,0	-2,9	-2,2	-1,6	-1,0	-0,3	0,0			
P12	0,9	-4,7	-5,2	-4,2	-3,1	-2,5	-1,9	-1,4	-0,9	-0,4	-0,1		
P13	1,0	-4,5	-4,9	-3,6	-2,3	-1,4	-0,6	0,3	1,0	1,5	1,5	0,7	
P14	0,9	-4,9	-5,6	-4,7	-3,7	-3,2	-2,7	-2,1	-1,6	-1,2	-0,7	-0,3	-0,1

Quadro 17 - Incremento de tensões nas interfaces para uma diminuição no peso das aduelas de 5% (Fibra Superior).

σ sup (kPa)	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	-1,4	-0,6											
P4	-1,7	-1,1	-0,6										
P5	-2,0	-1,2	-1,7	-0,9									
P6	-1,7	0,6	-0,2	-1,1	-0,7								
P7	-1,9	1,0	-0,4	-2,2	-2,7	-1,2							
P8	-1,7	1,6	0,4	-1,7	-3,1	-2,9	-1,2						
P9	-1,6	1,9	0,9	-1,2	-2,9	-3,6	-3,0	-1,2					
P10	-1,4	2,6	1,9	0,0	-1,8	-2,9	-3,3	-3,1	-1,3				
P11	-1,5	2,3	1,4	-1,0	-3,2	-4,8	-5,8	-5,9	-4,7	-1,8			
P12	-1,2	3,4	3,2	1,4	-0,3	-1,7	-2,8	-3,7	-4,1	-3,4	-1,4		
P13	-1,0	3,9	4,0	2,6	1,2	0,0	-1,1	-2,1	-2,9	-3,5	-3,1	-1,3	
P14	-1,0	4,1	4,2	2,9	1,4	0,3	-0,9	-2,1	-3,1	-3,9	-3,9	-3,0	-0,9

Como já foi mencionado anteriormente, o procedimento de subida de cilindros hidráulicos poderá ter maior impacto na limitação de tensões e, de modo a garantir o estado de compressão de juntas, é necessária a verificação de cumprimento de tensão mínima de compressão, que no caso de estudo foi de 150 kPa. Com a observação de resultados pode-se concluir facilmente que os incrementos de tensões associados a variação do peso próprio de aduelas não geram grande impacto nas tensões das interfaces, apresentando uma ordem de grandeza diminuta (tabelas com os valores das tensões encontram-se em Anexos A para o peso próprio previsto em projeto: tabelas 3(a), 3(b), 4(a), 4(b), 6(a), 6(b); Anexos B para o peso próprio com desvio de 5% positivo: tabelas 3(a), 3(b), 4(a), 4(b), 6(a), 6(b); e Anexos C para o peso próprio com desvio de 5% negativo: tabelas 3(a), 3(b), 4(a), 4(b), 6(a), 6(b);). Os valores negativos representam um aumento do esforço de compressão na interface, o que os torna irrelevantes para a análise, visto que neste caso a ação de alteração no peso próprio das aduelas é favorável. O maior incremento observado é de 9 kPa, e ocorre nas interfaces 7/8, 8/9 e 9/10 durante o posicionamento da aduela 13, ainda assim esse valor representa apenas cerca de 5% da variação de tensão gerada. Pode-se concluir então que uma ligeira variação no peso próprio previsto para as aduelas pré-fabricadas, não aparenta grande risco na segurança e comportamento estrutural das juntas.

5

CONCLUSÕES

5.1. CONCLUSÕES

A presente dissertação apresentou uma plataforma de conceitos técnicos inerentes à construção de pontes com aduelas pré-fabricadas, dando maior ênfase ao estudo de tensões nas interfaces durante o processo construtivo e consequentemente ao comportamento da resina epóxi.

O estado da arte de construção de pontes construídas com aduelas pré-fabricadas permitiu concluir que a presente tecnologia possui grande versatilidade construtiva, nomeadamente no que diz respeito às técnicas utilizadas e aos métodos de construção.

As particularidades de construção de pontes com aduelas pré-fabricadas permitiram entender inúmeros aspetos associados, tais como:

- Um excelente planeamento de todos os processos associados à execução da obra permite reduzir os riscos de atrasos na sua execução;
- Quanto aos métodos de pré-fabricação, destacam-se dois principais: método de linha longa e método de linha curta, apresentando cada um deles as suas vantagens e particularidades;
- O controlo geométrico é um processo bastante complexo, mas é considerado uma das partes essenciais do processo de monitorização da construção, que por sua vez garante um perfil longitudinal e transversal requerido;
- As primeiras pontes construídas com aduelas pré-fabricadas possuíam apenas uma chave de corte, no entanto, com o desenvolvimento da aplicação desta técnica, atualmente opta-se pela execução de várias chaves de corte, de modo a melhorar a transferência de esforços ao longo do tabuleiro;
- As juntas entre aduelas pré-fabricadas podem ser divididas em dois tipos: junta seca e junta com resina epóxi, apresentando cada uma delas as suas particularidades;
- O projeto de uma ponte de aduelas pré-fabricadas deve corresponder a uma série de requisitos impostos pelos regulamentos em vigor, aplicados em cada país onde a obra irá ser concebida. Contudo existe uma série de exigências que são aplicadas independentemente da localização da obra, como por exemplo a operacionalidade e garantia de resistência ao estado limite último e de utilização;
- O desempenho de pontes construídas com aduelas pré-fabricadas em zonas de atividade sísmica requer especial atenção – é necessário garantir o seu correto dimensionamento. De modo a alcançar esse objetivo é imprescindível considerar certas particularidades a nível estrutural e construtivo. A resina epóxi possibilita uma melhor performance sísmica de pontes em termos de dissipação de energia e redução de deslocamentos/deformações permanentes nas juntas.

Durante a abordagem de assuntos relacionados com a segurança e o comportamento estrutural das juntas entre aduelas pré-fabricadas, concluiu-se que as principais causas do incremento de tensões são as sobrecargas de construção, o efeito da deformação do equipamento construtivo e de variação térmica, o deficiente controlo geométrico, os defeitos nas superfícies de união e o fator do erro humano (considerado como um dos aspetos que provoca maior ameaça à segurança estrutural).

O estudo das características físicas e mecânicas de resina epóxi permitiu concluir que a sua utilização na colagem de aduelas pré-fabricadas deve-se à grande resistência mecânica e boa oposição à degradação ambiental. Uma adequada escolha, correta aplicação e, posteriormente, o comportamento do adesivo poderão fazer toda a diferença na construção e no desempenho de uma ponte de aduelas pré-fabricadas. Todavia, é de carácter obrigatório o cumprimento de regulamentação aplicável aos requisitos do desempenho de resina epóxi como, por exemplo, a garantia de tensão mínima de compressão durante o processo de cura.

Ao longo da elaboração da análise da construção da Ponte Laguna considerou-se a possibilidade do impacto da variação do peso próprio das aduelas nas tensões geradas e, consequentemente, na segurança e comportamento estrutural de juntas e de resina epóxi. Após a execução do procedimento de cálculo procedeu-se à análise de resultados e obtiveram-se as seguintes conclusões:

- A ordem de grandeza dos resultados dos esforços obtidos para o peso próprio previsto e para as variações de peso de 5% positivo e negativo foram bastante semelhantes;
- Durante o processo construtivo no caso de estudo apresentado, o procedimento de subida de cilindros hidráulicos apresentou-se o mais prejudicial no que diz respeito ao controlo de tensões nas interfaces, particularmente, à tensão na fibra inferior, provocando um incremento de tração. É de notar que esta fibra poderá apresentar tendência a não cumprir o esforço mínimo de compressão estabelecido para garantia de uma adequada cura de resina epóxi, tendo em conta que o efeito da atuação da gravidade com todos os esforços inerentes aos pesos tendem a tracioná-la, bem como a configuração da deformada, durante o procedimento construtivo, que gera tendencialmente trações na fibra inferior e compressões na fibra superior;
- Os incrementos de tensões inerentes às variações do peso próprio das aduelas não geram grande impacto nas tensões das interfaces, tendo uma ordem de grandeza diminuta;
- Os incrementos de curso durante o reposicionamento de aduelas pré-suspensas tiveram grande influência no controlo de tensões nas interfaces do tabuleiro, permitindo afirmar que é possível a utilização do sistema OPS para o controlo destas tensões.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Considerando a importância do incremento de tensões nas juntas entre aduelas e a sua influência no comportamento de resina epóxi, um dos possíveis trabalhos a desenvolver poderá ser um estudo analítico das probabilidades de risco derivados do fator de erro humano, tanto durante a elaboração do projeto, como durante a sua execução.

No âmbito de estudo de tensões geradas nas interfaces durante o processo construtivo, seria de grande utilidade a abordagem do problema com o enfoque em outros tipos de sistemas construtivos, bem como no impacto causado pelos diversos equipamentos construtivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Abdalla, H., A. *STRUCTURAL BEHAVIOR OF SEGMENTAL BRIDGES*. Dissertação de Doutorado, Graduate College of the University of Illinois at Chicago, 2001.
- [2] Alarcão, J. *O Domínio Romano em Portugal, 4ª Edição*. Publicações Europa-América, Lda., Sintra, 1988.
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, 2nd Edition*. American Association of State Highway and Transportation Officials., Washington, 2011.
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials *AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications*. Interim Edition, Washington, 2002.
- [5] American Association of State Highway and Transportation Officials *Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges, Second Edition*. AASHTO, Washington, 2003.
- [6] American Segmental Bridge Institute. *Construction Practices Handbook for Concrete Segmental and Cable-Supported Bridges*. American Segmental Bridge Institute, Texas, 2008.
- [7] Anagnostopoulou, M. *SEISMIC DESIGN AND ANALYSIS OF PRECAST SEGMENTAL CONCRETE BRIDGE SUPERSTRUCTURE*. Dissertação de Mestrado, Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia, 2009.
- [8] Azeredo, M., Azeredo, M., A. *As pontes do Porto – história de uma paixão*. FEUP Edições, 2002.
- [9] *BBR Cables for External Prestressing*. PCI JOURNAL, dia/mês/ano, páginas, BBR Systems Ltd., Zurich.
- [10] Bettigole, N., Robison, R. *BRIDGE DECKS*. ASCE PRESS, New York, 1997.
- [11] BERD *Estudo Sobre Controlo das Tensões nas Interfaces Entre Aduelas Durante o Processo Construtivo*. 01/08/2013, BERD
- [12] Brandão, A., P. *Estradas e Pontes Romanas*. Estradas de Portugal S.A., Almada, 1995.
- [13] Chen, W.-F., Duan, L. *Bridge Engineering Handbook (Construction and Maintenance), Second Edition*. Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, 2014.
- [14] Chen, W.-F., Duan, L. *Bridge Engineering Handbook (SEISMIC DESIGN), Second Edition*. Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, 2014.
- [15] Chen, W.-F., Duan, L. *Bridge Engineering Handbook (Superstructure Design), Second Edition*. Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, 2014.
- [16] Dhillon, B., S. *Human Reliability, Error, and Human Factors in Engineering Maintenance*. Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, 2009.
- [17] FIB *Prestressed Concrete Bridges*. FIB, Lausanne, 2004.
- [18] Florida Department of Transportation Bureau of Construction. *Segmental Manual (A Guide to the Construction of Segmental Bridges)*. Florida Department of Transportation Bureau of Construction, Florida, 1989.

- [19] Gama, N. *Durability of Epoxy Polymer Concrete Overlays for Bridge Decks*. Dissertação de Mestrado, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics McGill University Montreal, 1999.
- [20] Ger, J., Cheng, F., Y. *Seismic Design Aids*. Taylor & Francis Group LLC, Boca Raton, 2012.
- [21] Greazza, G., Mele, M. *ADVANCED PROBLEMS IN BRIDGE CONSTRUCTION*. Springer-Verlag Wien, New York, 1991.
- [22] Hewson, N., R. *Prestressed Concrete Bridges: Design and Construction*. Thomas Telford Publishing, London, 2006.
- [23] José, N.M., Prado, L.A. *MATERIAIS HÍBRIDOS ORGÂNICO-INORGÂNICOS: PREPARAÇÃO E ALGUMAS APLICAÇÕES*. Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance. 30/07/2009, 857-868, Taylor & Francis, London.
- [24] Khan, M., A. *Accelerated Bridge Construction*. Elsevier Inc., Waltham, 2015.
- [25] Koseki, K., Breen, J., E. *EXPLORATORY STUDY OF SHEAR STRENGTH OF JOINTS FOR PRECAST SEGMENTAL BRIDGES*. Center for Transportation Research The University of Texas at Austin Austin, Texas, 1983.
- [26] Kumar, K., Nathan, K.S., Varghese, K., Ananthanarayanan K. (2008). Automated Geometry Control of Precast Segmental Bridges. The 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 26 a 29 de Junho de 2008, Vilnius, Lithuania.
- [27] Liebenberg, A., C. *Concrete Bridges Design and Construction*. Longman Group UK Limited, Harlow, 1992.
- [28] Maré, F., L. *HISTÓRIA DAS INFRA-ESTRUTURAS RODOVIÁRIAS*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2011.
- [29] Megally, S., H., Garg, M., Seible, F., Dowell, R., K. *SEISMIC PERFORMANCE OF PRECAST SEGMENTAL BRIDGE SUPERSTRUCTURES*. Department of Structural Engineering University of California, California, 2002.
- [30] Menn, C., tradução Gauvreau, P. *Prestressed Concrete Bridges*. Birkhäuser Verlag AG Basel, Birkhäuser, 1990.
- [31] Meyer, M. *Under-Slung and Overhead Gantries for Span by Span Erection of Precast Segmental Bridge Decks*. Structural Engineering International, 04/11/2010, 399-405, IABSE, Lucerne.
- [32] Milanese, A., C. *PROCESSAMENTO E CARACTERIZACAO DE COMPOSITOFIBRA DE SISAL/RESINA EPOXI VIA RTM*. Dissertação de Doutorado, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratingueta, Universidade Estadual Paulista, 2012.
- [33] Newson, N., R. *Prestressed Concrete Bridges, 2nd edition*. ICE Publishing, Cidade de publicação, ano.
- [34] O'Brien, E., J., Keogh, D., L. *Bridge Deck Analysis*. Taylor & Francis Group, New York, 2005.
- [35] O'Connor, C., Shaw, P., A. *Bridge Loads. An international perspective*. Taylor & Francis Group, New York, 2002.
- [36] Pacheco, P., Resende, A., Coelho, H. *ACHIEVING HIGH PRODUCTIVITY IN BRIDGE CONSTRUCTION – THE ORGANIC PRESTRESSING IMPACT*. 9th International Conference

- on Short and Medium Span Bridges Calgary, Alberta, Julho 15-18, 2014, Canada, páginas, Editora, Cidade de publicação.
- [37] Pacheco, P. *Apontamentos das aulas teóricas de Unidade Curricular PONTES*. Mestrado Integrado em Engenharia Civil, 2014-2015, FEUP.
- [38] Pascault, J.-P., Williams, R.J.J. *Epoxy Polymers*. Wiley-VCH, Weinheim, 2010.
- [39] Podolny, W., Jr., Ph.D., P.E., Muller J. M. *Construction and Design of Prestressed Concrete Segmental Bridges*. John Wiley & Sons, Paris, 1982.
- [40] Rodrigues, A., V. *História Breve da Engenharia Civil – Pilar da Civilização Ocidental*. Ordem dos Engenheiros Região Norte, Porto, 2006.
- [41] Rombach, G. *Precast Segmental Box Girder Bridges with External Prestressing – Design and Construction*. INSA, Rennes, 2002.
- [42] Sami Megally, Ph. D., Frieder Seible, Ph. D., P., E., Robert K. Dowell, Ph. D., P., E. *Seismic Performance of Precast Segmental Bridges: Segment-to-Segment Joints Subjected to High Flexural Moments and Low Shears*. PCI JOURNAL, dia/mês/ano, 80-96, Editor, Cidade de publicação.
- [43] Sika Corporation *KPM Bridges: Segmental Concrete Bridges*. Technical News, 2008, páginas, Editor, Cidade de publicação.
- [44] Sousa, P., M., R. *CONTROLO GEOMÉTRICO DE TABULEIROS DE PONTES CONSTRUÍDAS TRAMO A TRAMO COM ADUELAS*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2013.
- [45] Tarrataca, T., J., S. *Construção de pontes com aduelas pré-fabricadas*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2009.
- [46] Turmo, J., Ramos, G., Aparicio, A.C. *Shear strength of dry joints of concrete panels with and without steel fibres (Application to precast segmental bridges)*. ELSEVIER, 24/08/2005, páginas, Elsevier Ltd., 2005.
- [47] Turmo, J., Ramos, G., Aparicio, A.C. *Structural behavior of segmental concrete continuous bridges with unbonded prestressing and dry joints*. Quim. Nova, Vol. 28, No. 2, 281-288, 2005.
- [48] VSL International Ltd. *Bridge Construction Partner*. VSL International Ltd., Labège, 2013.
- [49] http://www.dsiminingproducts.com/uploads/pics/DSI_USA_Victory_Bridge_Replacement_03.jpg Data de acesso: 13-05-2015
- [50] http://www.bbrnetwork.com/uploads/pics/ConstMeth_SpanbySpan_01.jpg Data de acesso: 13-05-2015
- [51] http://www.doka.com/web/media/images/Viaducto-LAV-01_hot.jpg Data de acesso: 13-05-2015
- [52] <http://www.4bridges.eu/gfx/prodotti/L04.jpg> Data de acesso: 13-05-2015
- [53] <http://www.richterassociates.co.uk/wp-content/uploads/2013/07/6-East-Moors-General.jpg> Data de acesso: 13-05-2015
- [54] <http://files1.structurae.de/files/300x200/64/oise/p1150842.jpg> Data de acesso: 13-05-2015
- [55] <http://www.bdonline.co.uk/building-bridges-within-the-construction-industry/5010315.article> Data de acesso: 13-05-2015

- [56] <http://www.1000dias.com/fototmp/574-a-enorme-ponte-natural-no-natural-bridge-park,-na-virginia,-nos-estados-unidos-p1030720.jpg> Data de acesso: 13-05-2015
- [57] <http://mountainsarecallingmustgo.files.wordpress.com/2011/06/dsc04088.jpg> Data de acesso: 13-05-2015
- [58] http://rolfgross.dreamhosters.com/Rome-Guide/Bridges/Bridges_html_204323f5.jpg Data de acesso: 13-05-2015
- [59] <http://static.panoramio.com/photos/large/7077340.jpg> Data de acesso: 13-05-2015
- [60] <http://files1.structurae.de/files/192x128/64/choisy03.jpg> Data de acesso: 13-05-2015
- [61] http://images.sudouest.fr/images/2012/07/03/760139_20677439_460x306.jpg Data de acesso: 13-05-2015
- [62] http://www.shutterstock.com/cat.mhtml?page=3&tracking_id=cwFnQf_EK8n2_jhJk1BQ&country_code=PT&thumb_size=mosaic&similar_photo_id=184918340&search_type=similar&search_language=pt&safeSearch=1 Data de acesso: 13-05-2015
- [63] <http://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=404> Data de acesso: 13-05-2015
- [64] http://www.pinstopin.com/balanced-cantilever-bridge-construction/Zmh3YSpkb3QqZ292fGJyaWRnZXxwdHxpbWFnZXN8cHQxMTMqanBn_Zmh3YSpkb3QqZ292fGJyaWRnZXxwdHxwdDAxKmNmbQ/ Data de acesso: 13-05-2015
- [65] <http://www.vsl-ip.com/> Data de acesso: 11-05-2015
- [66] www.americanbridge.net Data de acesso: 11-05-2015
- [67] <http://www.metamere.com/images/segmentalbridgeunderconstruction4.jpg> Data de acesso: 14-05-2015
- [68] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/55/Pont_myc%C3%A9nien_de_Kazarma_2.jpg Data de acesso: 14-05-2015
- [69] <http://www.origens.pt/files/content/20/50/473.jpg> Data de acesso: 22-07-2015
- [70] <http://2.bp.blogspot.com/DOzTO2a7cBQ/TgYKruGS3FI/AAAAAAAAACKg/B32OFDpjUUc/s1600/P1020185-1.JPG> Data de acesso: 22-07-2015
- [71] <http://2.bp.blogspot.com/-bnLeDVmxQmU/TxUaH68Rbhl/AAAAAAAAAIlk/fqTWN-U7xBg/s1600/images1.jpg> Data de acesso: 22-07-2015
- [72] <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/13028/images/figure25.png> Data de acesso: 23-07-2015

ANEXOS

ANEXO A – PESO PRÓPRIO DE ADUELAS PREVISTO EM PROJETO

TABELA 1 - Esforços permanentes que resultam do procedimento de posicionamento das aduelas (Efeito OPS) - Momento Fletor (kNm)

	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	-47	0											
P4	-63	7	0										
P5	-53	63	29	0									
P6	-56	82	24	-12	0								
P7	-87	12	-101	-125	-37	0							
P8	-87	12	-100	-119	-28	5	0						
P9	-86	15	-95	-114	-21	17	7	0					
P10	-113	-91	-256	-295	-186	-110	-65	-21	0				
P11	-144	-209	-439	-510	-398	-293	-201	-100	-25	0			
P12	-183	-358	-672	-788	-681	-553	-414	-246	-99	-20	0		
P13	-231	-544	-968	-1155	-1078	-948	-778	-553	-325	-147	-37	0	
P14	-263	-665	-1162	-1400	-1350	-1230	-1054	-807	-540	-308	-131	-28,3218	0

TABELA 2(a) - Esforços do procedimento de transferência de carga (Procedimento de Suspensão, subida de cilindros hidráulicos) - Momento Fletor (kNm)

	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	87	53											
P4	68	119	64										
P5	56	132	158	76									
P6	79	214	301	280	117								
P7	55	161	250	295	263	112							
P8	50	154	252	324	348	295	122						
P9	42	134	228	309	365	374	308	126					
P10	49	161	279	392	488	546	537	419	164				
P11	31	101	179	260	337	401	440	433	346	139			
P12	23	75	134	198	263	326	379	410	399	321	131		
P13	22	76	138	207	282	360	435	498	533	511	396	156	
P14	14	47	86	131	181	236	295	352	399	424	402	305	92

TABELA 2(b) - Esforços do procedimento de transferência de carga (Procedimento de Suspensão, descida da ponte rolante) - Momento Fletor (kNm)

	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	-23	-14											
P4	-26	-40	-20										
P5	-25	-58	-64	-27									
P6	-13	-36	-52	-53	-24								
P7	-27	-73	-112	-128	-106	-41							
P8	-22	-64	-105	-137	-150	-122	-47						
P9	-23	-71	-119	-161	-189	-194	-151	-56					
P10	-8	-26	-45	-63	-79	-89	-90	-75	-31				
P11	-22	-70	-122	-173	-218	-253	-269	-253	-186	-68			
P12	-11	-35	-63	-93	-123	-153	-177	-192	-188	-145	-54		
P13	-5	-15	-28	-42	-58	-74	-90	-104	-112	-112	-92	-37	
P14	-6	-18	-33	-52	-74	-98	-124	-149	-170	-181	-170	-122	-34

TABELA 3(a) - Tensões que resultam do procedimento de posicionamento das aduelas (Efeito OPS) - Tensão cinf (kPa)

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	213	207											
P4	215	206	207										
P5	214	199	203	207									
P6	214	197	204	209	207								
P7	218	205	220	223	212	207							
P8	218	206	220	222	211	206	207						
P9	218	205	219	221	210	205	206	207					
P10	221	218	239	244	230	221	215	210	207				
P11	225	233	262	271	257	244	232	220	210	207			
P12	230	252	292	306	293	277	259	238	219	209	207		
P13	236	275	329	352	343	326	305	277	248	226	212	207	
P14	240	291	353	383	377	362	340	309	275	246	223	211	207

TABELA 3(b) - Tensões que resultam do procedimento de posicionamento das aduelas (Efeito OPS) - Tensão osup (kPa)

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	347	352											
P4	345	353	352										
P5	346	359	355	352									
P6	345	362	355	351	352								
P7	342	353	340	338	348	352							
P8	342	353	340	338	349	353	352						
P9	342	354	341	339	350	354	353	352					
P10	339	341	322	318	330	339	344	350	352				
P11	335	328	301	293	306	318	329	340	349	352			
P12	331	311	274	261	273	288	304	323	341	350	352		
P13	325	289	240	218	227	242	262	288	314	335	348	352	
P14	322	275	217	190	196	209	230	259	289	316	337	349	352

TABELA 4(a) - Tensões que resultam do procedimento de transferência de carga (Procedimento de Suspensão) - Tensão cinf (kPa)

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	196	200											
P4	198	192	199										
P5	200	190	187	197									
P6	197	180	169	172	192								
P7	200	187	176	170	174	193							
P8	201	188	175	166	163	170	192						
P9	202	190	178	168	161	160	168	191					
P10	201	187	172	158	146	138	139	154	186				
P11	203	194	184	174	165	156	152	153	163	189			
P12	204	198	190	182	174	166	159	155	157	167	191		
P13	204	197	190	181	172	162	152	144	140	143	157	187	
P14	205	201	196	191	184	177	170	163	157	154	156	169	195

TABELA 4(b) - Tensões que resultam do procedimento de transferência de carga (Procedimento de Suspensão) - Tensão σ_{sup} (kPa)

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	349	350											
P4	349	347	350										
P5	349	345	345	349									
P6	350	348	346	346	349								
P7	349	344	339	337	340	347							
P8	349	345	340	336	335	338	347						
P9	349	344	338	333	330	330	334	345					
P10	351	349	347	345	343	342	342	343	348				
P11	349	344	338	332	327	323	321	323	330	344			
P12	351	348	345	341	338	334	332	330	330	335	346		
P13	351	350	349	347	345	343	342	340	339	339	341	348	
P14	351	350	348	346	343	341	338	335	332	331	332	338	348

TABELA 5(a) - Esforços que resultam do Procedimento de Suspensão + Efeito OPS - Momento Fletor (kNm) [σ_{inf}]

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	40	53											
P4	5	126	64										
P5	3	196	186	76									
P6	22	297	324	268	117								
P7	-32	173	149	170	225	112							
P8	-37	166	152	205	320	300	122						
P9	-44	150	132	195	344	391	315	126					
P10	-64	70	23	97	301	436	472	398	164				
P11	-113	-107	-260	-251	-61	108	239	332	321	139			
P12	-160	-283	-538	-590	-418	-226	-34	164	301	301	131		
P13	-209	-468	-830	-948	-796	-588	-343	-55	208	364	359	156	
P14	-249	-618	-1076	-1269	-1169	-994	-759	-455	-141	116	272	277	92

TABELA 5(b) - Esforços que resultam do Procedimento de Suspensão + Efeito OPS - Momento Fletor (kNm) [σ_{sup}]

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	-70	-14											
P4	-90	-33	-20										
P5	-78	6	-35	-27									
P6	-70	47	-28	-65	-24								
P7	-114	-61	-213	-253	-143	-41							
P8	-109	-52	-205	-257	-178	-117	-47						
P9	-109	-55	-214	-276	-210	-177	-144	-56					
P10	-121	-116	-301	-358	-265	-199	-155	-96	-31				
P11	-166	-279	-561	-683	-616	-546	-471	-354	-211	-68			
P12	-193	-393	-735	-881	-804	-705	-590	-438	-287	-165	-54		
P13	-236	-560	-996	-1198	-1135	-1021	-867	-657	-438	-259	-129	-37	
P14	-268	-682	-1195	-1452	-1424	-1328	-1178	-956	-710	-489	-300	-150	-34

TABELA 6(a) - Tensões que resultam do Procedimento de Suspensão + Efeito OPS - Tensão (kPa) [σ_{inf}]

	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	202	200											
P4	206	191	199										
P5	207	182	184	197									
P6	204	170	166	173	192								
P7	211	185	188	186	179	193							
P8	212	186	188	181	167	169	192						
P9	212	188	190	182	164	158	167	191					
P10	215	198	204	195	169	152	148	157	186				
P11	221	221	240	239	215	193	177	165	167	189			
P12	227	243	275	281	280	235	211	186	169	169	191		
P13	233	266	312	326	307	281	250	214	181	161	162	187	
P14	238	285	342	367	354	332	303	264	225	192	173	172	195

TABELA 6(b) - Tensões que resultam do Procedimento de Suspensão + Efeito OPS - Tensão (kPa) [σ_{sup}]

	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	344	350											
P4	342	348	350										
P5	343	353	348	349									
P6	344	357	349	344	349								
P7	339	345	327	323	335	347							
P8	339	346	328	322	331	338	347						
P9	339	346	327	320	328	331	335	345					
P10	338	339	317	311	321	329	334	341	348				
P11	333	320	287	273	281	289	297	311	328	344			
P12	330	306	267	250	259	270	284	301	319	333	346		
P13	325	287	237	213	220	234	251	276	301	322	337	348	
P14	321	273	214	184	187	198	216	241	270	295	317	335	348

ANEXO B – PESO PRÓPRIO DE ADUELAS PREVISTO EM PROJETO + DESVIO DE 5%

TABELA 1 - Esforços permanentes que resultam do procedimento de posicionamento das aduelas (Efeito OPS) - Momento Fletor (kNm)

	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	-52	0											
P4	-72	7	0										
P5	-64	68	31	0									
P6	-68	96	34	-9	0								
P7	-98	38	-77	-113	-34	0							
P8	-97	39	-74	-104	-23	6	0						
P9	-96	44	-66	-96	-12	21	8	0					
P10	-122	-59	-223	-273	-174	-103	-62	-20	0				
P11	-152	-174	-403	-483	-380	-282	-194	-97	-24	0			
P12	-190	-321	-632	-757	-658	-536	-401	-239	-95	-19	0		
P13	-238	-506	-926	-1121	-1052	-927	-762	-543	-319	-144	-36	0	
P14	-270	-626	-1118	-1364	-1322	-1207	-1035	-793	-531	-303	-129	-27,9008	0

TABELA 2(a) - Esforços do procedimento de transferência de carga (Procedimento de Suspensão, subida de cilindros hidráulicos) - Momento Fletor (kNm)

	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	96	58											
P4	75	131	70										
P5	62	146	174	85									
P6	86	234	329	308	130								
P7	59	174	271	320	286	122							
P8	56	171	280	361	387	328	136						
P9	47	148	251	342	403	413	341	140					
P10	53	174	301	424	528	591	582	456	179				
P11	34	111	196	284	369	441	485	478	384	155			
P12	24	81	145	214	285	353	410	444	432	348	142		
P13	25	85	154	232	316	403	487	559	598	574	447	176	
P14	15	51	93	142	196	256	319	380	431	458	435	331	100

TABELA 2(b) - Esforços do procedimento de transferência de carga (Procedimento de Suspensão, descida da ponte rolante) - Momento Fletor (kNm)

	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	-15	-9											
P4	-21	-31	-15										
P5	-22	-52	-57	-24									
P6	-10	-26	-38	-38	-17								
P7	-21	-58	-89	-101	-82	-32							
P8	-18	-53	-87	-114	-124	-101	-38						
P9	-20	-60	-101	-137	-160	-164	-127	-47					
P10	-6	-18	-31	-44	-55	-63	-63	-52	-22				
P11	-18	-59	-102	-145	-182	-210	-223	-209	-152	-55			
P12	-9	-30	-54	-79	-104	-129	-149	-162	-160	-122	-45		
P13	-4	-13	-23	-34	-47	-60	-73	-84	-90	-88	-71	-28	
P14	-5	-14	-27	-42	-60	-80	-101	-122	-139	-148	-139	-99	-28

TABELA 3(a) - Tensões que resultam do procedimento de posicionamento das aduelas (Efeito OPS) - Tensão σ_{inf} (kPa)

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	214	207											
P4	216	206	207										
P5	215	198	203	207									
P6	216	195	203	208	207								
P7	219	202	217	221	211	207							
P8	219	202	216	220	210	206	207						
P9	219	201	215	219	209	204	206	207					
P10	222	214	235	241	229	220	215	210	207				
P11	226	229	258	268	255	242	231	219	210	207			
P12	231	247	286	302	290	274	257	237	219	209	207		
P13	237	271	324	348	339	324	303	275	247	225	212	207	
P14	241	286	348	379	373	359	337	307	274	245	223	211	207

TABELA 3(b) - Tensões que resultam do procedimento de posicionamento das aduelas (Efeito OPS) - Tensão σ_{sup} (kPa)

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	346	352											
P4	344	353	352										
P5	345	360	356	352									
P6	344	363	356	351	352								
P7	341	356	343	339	348	352							
P8	341	357	343	340	349	353	352						
P9	341	357	344	341	351	354	353	352					
P10	338	345	326	320	332	340	345	350	352				
P11	334	332	305	296	308	319	329	341	349	352			
P12	330	315	279	264	276	290	306	324	341	350	352		
P13	324	293	245	222	230	245	264	289	315	335	348	352	
P14	321	280	222	194	199	212	232	260	290	317	337	349	352

TABELA 4(a) - Tensões que resultam do procedimento de transferência de carga (Procedimento de Suspensão) - Tensão σ_{inf} (kPa)

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	195	200											
P4	198	190	198										
P5	199	189	185	196									
P6	196	178	166	168	191								
P7	200	185	173	167	171	192							
P8	200	185	172	162	158	166	190						
P9	201	188	175	164	156	155	164	189					
P10	200	185	169	154	141	133	134	150	184				
P11	203	193	182	171	161	151	146	147	159	188			
P12	204	197	189	180	171	163	155	151	153	163	189		
P13	204	196	188	178	167	156	146	137	132	135	151	185	
P14	205	201	195	189	182	175	167	159	153	149	152	165	194

TABELA 4(b) - Tensões que resultam do procedimento de transferência de carga (Procedimento de Suspensão) - Tensão σ_{sup} (kPa)

	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	350	351											
P4	350	348	350										
P5	349	346	345	349									
P6	351	349	348	348	350								
P7	350	345	342	340	343	348							
P8	350	346	342	339	338	340	348						
P9	350	345	340	336	333	333	337	347					
P10	351	350	348	347	346	345	345	346	350				
P11	350	345	340	335	331	328	326	328	334	346			
P12	351	349	346	343	340	337	335	333	334	338	347		
P13	352	351	349	348	347	345	344	342	342	344	349		
P14	351	350	349	347	345	343	340	338	336	335	336	341	349

TABELA 5(a) - Esforços que resultam do Procedimento de Suspensão + Efeito OPS - Momento Fletor (kNm) [σ_{inf}]

	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	44	58											
P4	4	138	70										
P5	-2	214	205	85									
P6	18	330	363	299	130								
P7	-38	212	194	208	252	122							
P8	-41	210	206	256	364	334	136						
P9	-49	193	185	246	391	434	349	140					
P10	-68	115	78	151	354	488	520	436	179				
P11	-119	-63	-207	-199	-11	159	291	380	360	155			
P12	-166	-240	-487	-543	-373	-183	9	205	337	329	142		
P13	-213	-422	-772	-889	-736	-525	-275	16	279	430	411	176	
P14	-255	-575	-1025	-1222	-1126	-951	-717	-413	-100	155	306	303	100

TABELA 5(b) - Esforços que resultam do Procedimento de Suspensão + Efeito OPS - Momento Fletor (kNm) [σ_{sup}]

	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	-67	-9											
P4	-93	-23	-15										
P5	-86	17	-26	-24									
P6	-77	70	-4	-47	-17								
P7	-119	-20	-166	-214	-116	-32							
P8	-115	-14	-161	-218	-147	-94	-38						
P9	-115	-15	-167	-233	-172	-144	-119	-47					
P10	-128	-77	-255	-317	-229	-166	-125	-73	-22				
P11	-171	-233	-505	-628	-562	-492	-418	-306	-176	-55			
P12	-200	-351	-685	-835	-763	-665	-551	-401	-254	-141	-45		
P13	-242	-519	-949	-1156	-1099	-987	-835	-627	-409	-233	-107	-28	
P14	-274	-640	-1145	-1406	-1382	-1287	-1136	-915	-670	-452	-267	-127	-28

TABELA 6(a) - Tensões que resultam do Procedimento de Suspensão + Efeito OPS - Tensão (kPa) [σ_{inf}]

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	201	200											
P4	207	190	198										
P5	207	180	181	196									
P6	205	165	161	169	191								
P7	212	180	183	181	175	192							
P8	212	181	181	175	161	165	190						
P9	213	183	184	176	158	152	163	189					
P10	216	193	197	188	162	146	142	152	184				
P11	222	215	233	232	208	187	170	159	162	188			
P12	228	237	268	275	254	230	206	181	165	166	189		
P13	234	260	304	319	300	273	242	205	172	153	155	185	
P14	239	279	336	361	349	327	297	259	220	188	168	169	194

TABELA 6(b) - Tensões que resultam do Procedimento de Suspensão + Efeito OPS - Tensão (kPa) [σ_{sup}]

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	344	351											
P4	341	349	350										
P5	342	354	349	349									
P6	343	360	352	347	350								
P7	338	350	333	327	339	348							
P8	339	350	333	327	335	341	348						
P9	339	350	333	325	332	335	338	347					
P10	337	343	322	315	325	333	338	344	350				
P11	332	325	293	279	287	295	304	316	332	346			
P12	329	311	273	255	264	275	288	306	323	336	347		
P13	324	292	242	218	225	238	255	279	305	325	340	349	
P14	320	278	219	189	192	203	220	246	274	300	321	337	349

ANEXO C – PESO PRÓPRIO DE ADUELAS PREVISTO EM PROJETO - DESVIO DE 5%

TABELA 1 - Esforços permanentes que resultam do procedimento de posicionamento das aduelas (Efeito OPS) - Momento Fletor (kNm)

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	-43	0											
P4	-54	7	0										
P5	-42	58	26	0									
P6	-45	69	14	-15	0								
P7	-77	-13	-124	-137	-40	0							
P8	-77	-15	-126	-134	-33	4	0						
P9	-77	-14	-124	-132	-29	14	6	0					
P10	-104	-122	-289	-317	-199	-117	-68	-22	0				
P11	-136	-243	-476	-538	-416	-305	-208	-103	-25	0			
P12	-175	-394	-712	-820	-704	-570	-426	-254	-103	-21	0		
P13	-223	-582	-1010	-1189	-1103	-968	-793	-564	-332	-150	-38	0	
P14	-255	-704	-1206	-1437	-1379	-1253	-1073	-820	-549	-313	-133	-28,7428	0

TABELA 2(a) - Esforços do procedimento de transferência de carga (Procedimento de Suspensão, subida de cilindros hidráulicos) - Momento Fletor (kNm)

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	88	54											
P4	69	121	65										
P5	56	132	158	77									
P6	77	209	294	275	116								
P7	55	161	250	296	264	113							
P8	50	154	252	325	348	295	123						
P9	42	134	226	307	363	372	307	126					
P10	48	156	270	380	472	529	522	409	160				
P11	30	99	176	255	331	396	435	428	344	139			
P12	22	74	133	196	261	324	376	407	396	319	130		
P13	23	78	141	212	289	369	446	511	547	526	409	161	
P14	14	47	85	130	180	234	292	348	395	420	399	303	91

TABELA 2(b) - Esforços do procedimento de transferência de carga (Procedimento de Suspensão, descida da ponte rolante) - Momento Fletor (kNm)

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	-15	-9											
P4	-20	-30	-15										
P5	-18	-42	-46	-19									
P6	-10	-28	-40	-40	-18								
P7	-20	-56	-66	-98	-79	-31							
P8	-17	-50	-83	-108	-118	-96	-37						
P9	-19	-58	-98	-133	-156	-160	-124	-46					
P10	-5	-17	-29	-41	-51	-57	-58	-48	-20				
P11	-17	-56	-97	-137	-173	-200	-212	-199	-145	-53			
P12	-9	-28	-50	-74	-98	-121	-140	-152	-149	-114	-43		
P13	-3	-11	-21	-31	-42	-54	-65	-75	-81	-79	-65	-26	
P14	-4	-14	-26	-41	-58	-77	-97	-117	-134	-143	-133	-95	-27

TABELA 3(a) - Tensões que resultam do procedimento de posicionamento das aduelas (Efeito OPS) - Tensão σ_{inf} (kPa)

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	212	207											
P4	214	206	207										
P5	212	200	204	207									
P6	213	198	205	209	207								
P7	217	209	223	224	212	207							
P8	217	209	223	224	211	206	207						
P9	217	209	223	224	211	205	206	207					
P10	220	222	243	247	232	222	216	210	207				
P11	224	238	267	275	259	245	233	220	210	207			
P12	229	257	297	310	296	279	261	239	220	210	207		
P13	235	280	334	357	346	329	307	278	249	226	212	207	
P14	239	296	359	388	380	365	342	310	276	246	224	211	207

TABELA 3(b) - Tensões que resultam do procedimento de posicionamento das aduelas (Efeito OPS) - Tensão σ_{sup} (kPa)

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	347	352											
P4	346	353	352										
P5	347	359	355	352									
P6	347	360	354	350	352								
P7	343	350	338	336	347	352							
P8	343	350	337	336	348	353	352						
P9	343	350	338	337	349	354	353	352					
P10	340	338	319	315	329	338	344	349	352				
P11	336	324	297	290	304	317	328	340	349	352			
P12	332	306	269	257	270	286	303	323	340	350	352		
P13	326	285	235	214	224	240	260	287	314	335	348	352	
P14	322	270	212	186	192	207	228	257	288	316	337	349	352

TABELA 4(a) - Tensões que resultam do procedimento de transferência de carga (Procedimento de Suspensão) - Tensão σ_{inf} (kPa)

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	196	200											
P4	198	192	199										
P5	200	190	187	197									
P6	197	181	170	172	192								
P7	200	187	175	170	174	193							
P8	201	188	175	166	163	170	192						
P9	202	190	179	168	161	160	168	191					
P10	201	187	173	159	148	140	141	156	187				
P11	203	195	185	175	165	157	152	153	164	190			
P12	204	198	190	182	174	166	160	156	157	167	191		
P13	204	197	189	180	171	161	151	143	138	141	156	187	
P14	205	201	196	191	184	178	170	163	157	154	157	169	196

TABELA 4(b) - Tensões que resultam do procedimento de transferência de carga (Procedimento de Suspensão) - Tensão σ_{sup} (kPa)

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	350	351											
P4	350	349	350										
P5	350	347	347	350									
P6	351	349	347	347	350								
P7	350	346	342	341	343	348							
P8	350	346	342	339	338	341	348						
P9	350	345	341	337	334	333	338	347					
P10	351	350	349	347	346	345	345	346	350				
P11	350	346	341	336	332	329	327	329	335	346			
P12	351	349	346	343	341	338	336	334	335	339	347		
P13	352	351	350	348	347	346	344	343	343	343	344	349	
P14	351	350	349	347	345	343	341	338	336	335	337	341	349

TABELA 5(a) - Esforços que resultam do Procedimento de Suspensão + Efeito OPS - Momento Fletor (kNm) [σ_{inf}]

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	45	54											
P4	15	127	65										
P5	14	190	184	77									
P6	32	278	307	260	116								
P7	-22	147	126	159	224	113							
P8	-27	139	126	191	315	300	123						
P9	-35	120	102	175	334	386	313	126					
P10	-56	33	-19	63	274	413	453	387	160				
P11	-106	-144	-301	-283	-85	91	226	325	319	139			
P12	-153	-321	-580	-624	-442	-246	-50	153	293	298	130		
P13	-200	-505	-889	-977	-814	-599	-347	-53	216	376	371	161	
P14	-242	-657	-1120	-1307	-1199	-1019	-781	-472	-154	106	266	274	91

TABELA 5(b) - Esforços que resultam do Procedimento de Suspensão + Efeito OPS - Momento Fletor (kNm) [σ_{sup}]

	Inter. 1/2	Inter. 2/3	Inter. 3/4	Inter. 4/5	Inter. 5/6	Inter. 6/7	Inter. 7/8	Inter. 8/9	Inter. 9/10	Inter. 10/11	Inter. 11/12	Inter. 12/13	Inter. 13/14
P3	-58	-9											
P4	-75	-23	-15										
P5	-61	16	-20	-19									
P6	-55	41	-27	-55	-18								
P7	-97	-69	-210	-234	-120	-31							
P8	-94	-66	-209	-242	-152	-92	-37						
P9	-96	-72	-222	-265	-185	-146	-118	-46					
P10	-109	-139	-317	-358	-250	-174	-126	-70	-20				
P11	-153	-299	-573	-675	-588	-505	-421	-302	-170	-53			
P12	-183	-422	-762	-894	-802	-691	-566	-406	-252	-135	-43		
P13	-227	-593	-1031	-1220	-1145	-1021	-858	-639	-412	-229	-103	-26	
P14	-260	-717	-1232	-1477	-1436	-1330	-1170	-938	-683	-456	-266	-124	-27

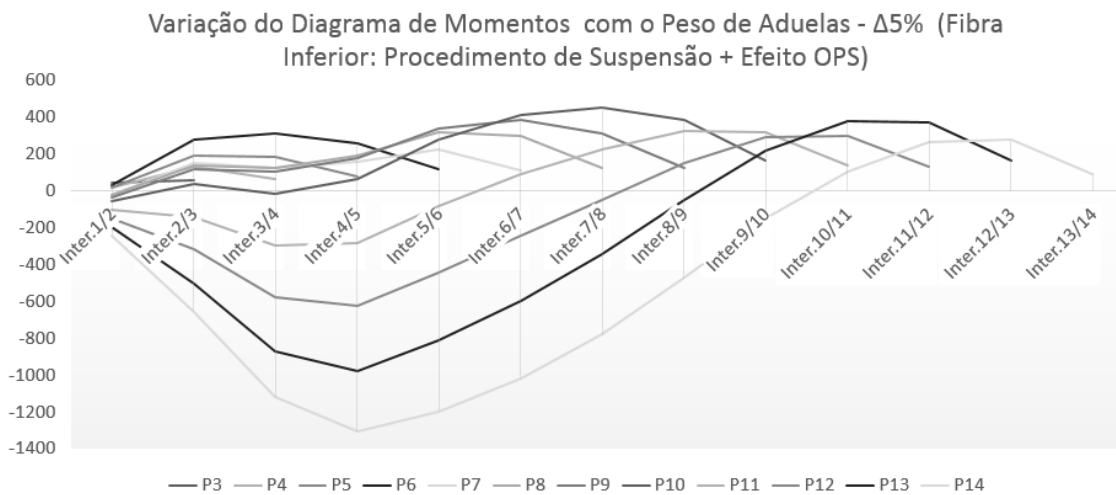
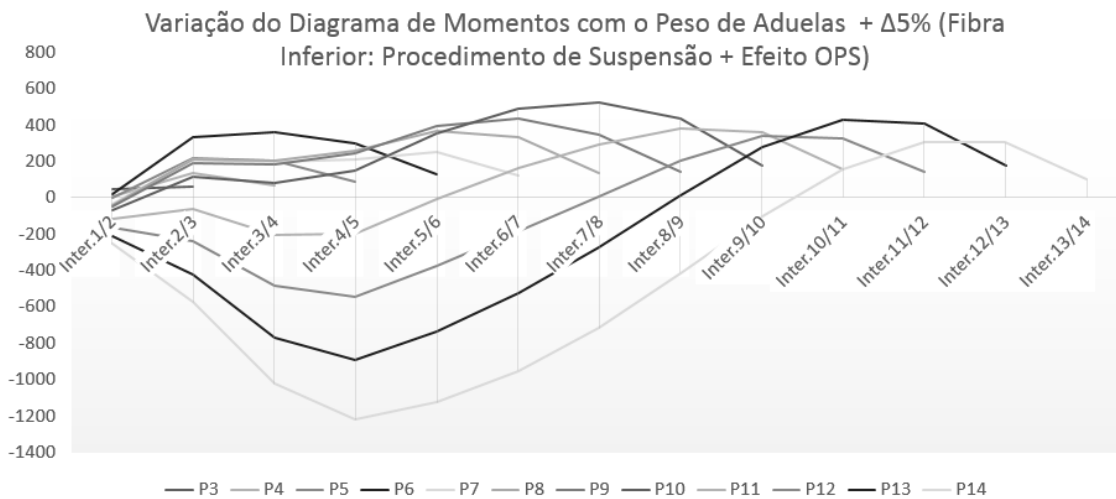
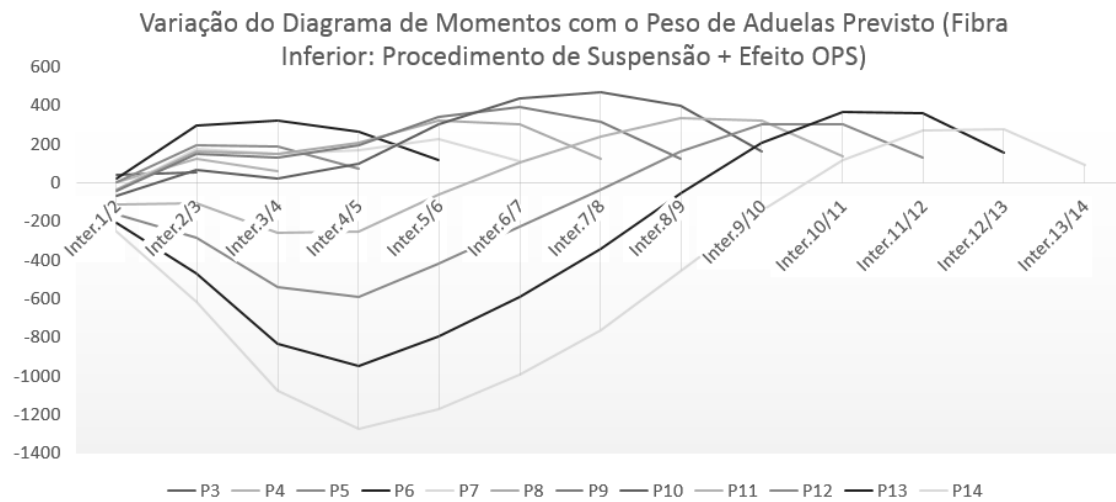
TABELA 6(a) - Tensões que resultam do Procedimento de Suspensão + Efeito OPS - Tensão (kPa) [σ_{inf}]

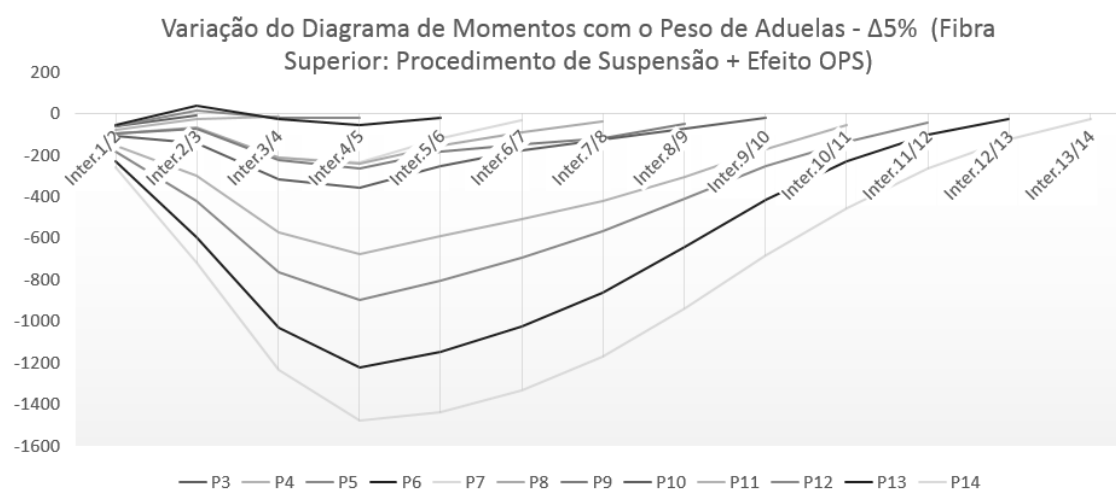
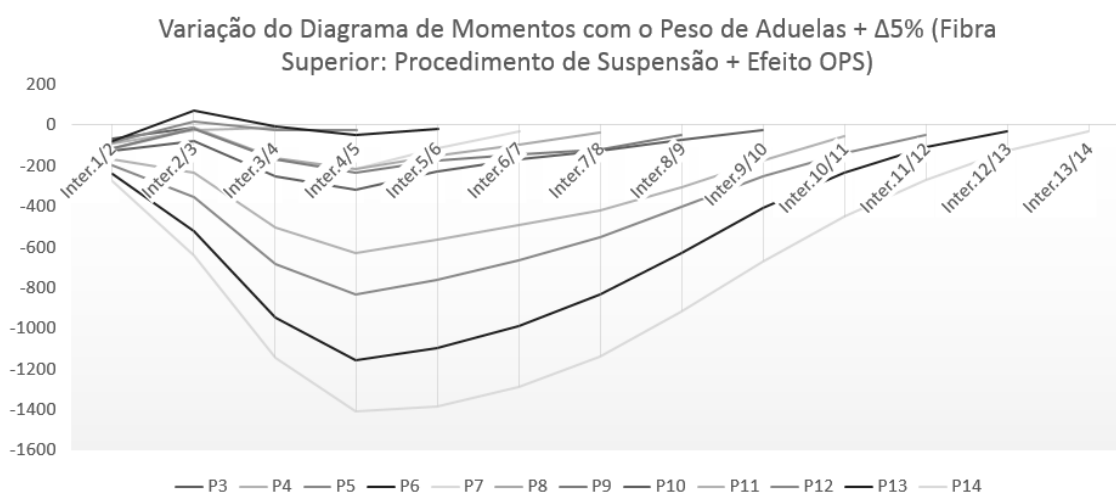
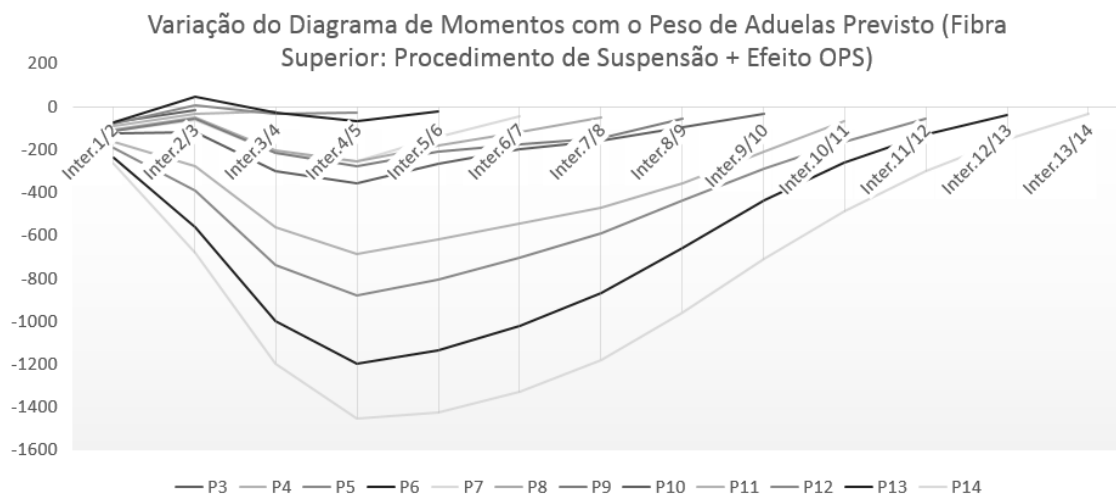
	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	201	200											
P4	205	191	199										
P5	205	183	184	197									
P6	203	172	168	174	192								
P7	210	188	191	187	179	193							
P8	210	190	191	183	167	169	192						
P9	211	192	194	185	165	158	168	191					
P10	214	203	209	199	173	155	150	158	187				
P11	220	225	245	243	218	196	179	166	167	190			
P12	226	247	280	285	263	238	213	188	170	170	191		
P13	232	270	316	330	309	282	251	214	180	160	160	187	
P14	237	290	348	371	358	335	305	266	226	194	174	172	196

TABELA 6(b) - Tensões que resultam do Procedimento de Suspensão + Efeito OPS - Tensão (kPa) [σ_{sup}]

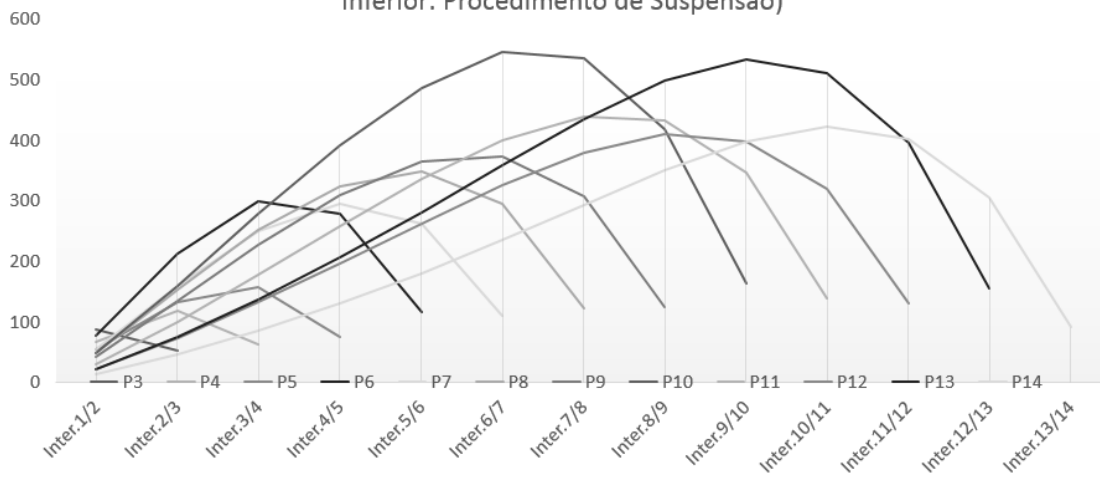
	Inter.1/2	Inter.2/3	Inter.3/4	Inter.4/5	Inter.5/6	Inter.6/7	Inter.7/8	Inter.8/9	Inter.9/10	Inter.10/11	Inter.11/12	Inter.12/13	Inter.13/14
P3	345	351											
P4	343	349	350										
P5	345	354	350	350									
P6	346	357	349	346	350								
P7	341	344	328	325	338	348							
P8	341	344	328	324	334	341	348						
P9	341	344	326	321	331	335	338	347					
P10	339	336	315	311	323	332	337	344	350				
P11	334	317	286	274	284	294	303	317	332	346			
P12	331	303	264	248	259	272	286	305	323	336	347		
P13	326	283	233	211	219	234	253	278	304	325	340	349	
P14	322	269	209	181	186	198	216	243	273	299	321	338	349

ANEXO D – GRÁFICOS

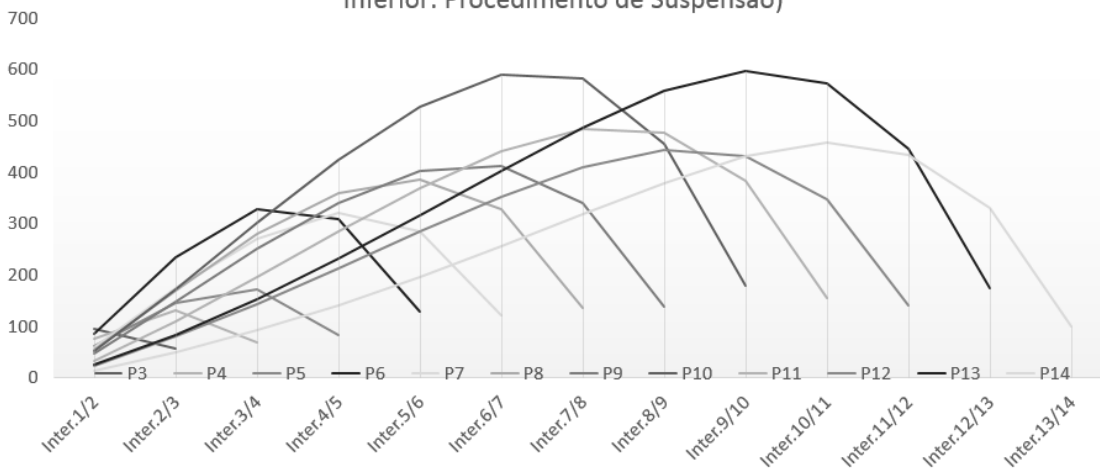




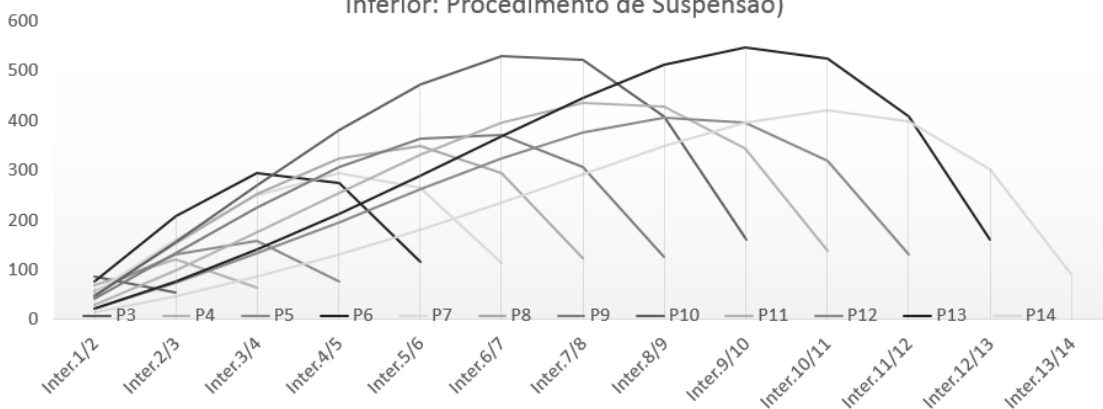
Variação do Diagrama de Momentos com o Peso de Aduelas Previsto (Fibra Inferior: Procedimento de Suspensão)



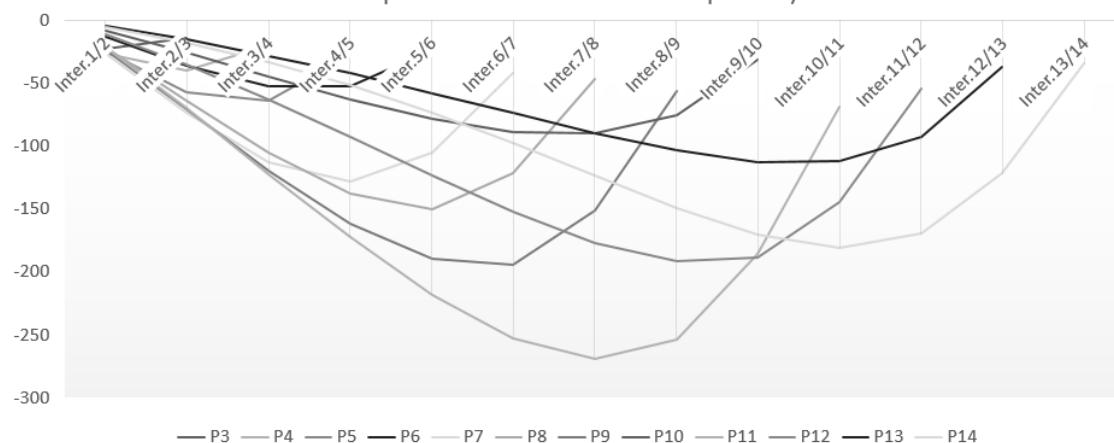
Variação do Diagrama de Momentos com o Peso de Aduelas + $\Delta 5\%$ (Fibra Inferior: Procedimento de Suspensão)



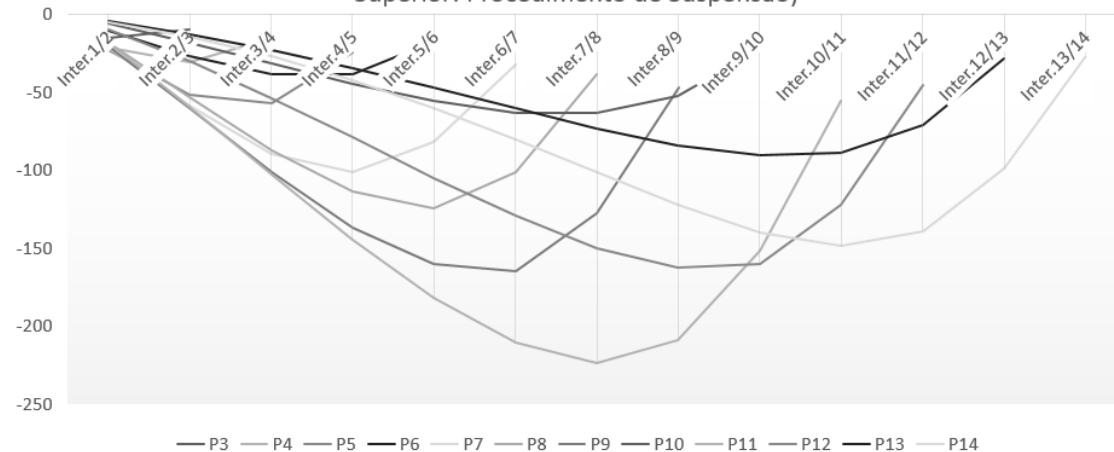
Variação do Diagrama de Momentos com o Peso de Aduelas - $\Delta 5\%$ (Fibra Inferior: Procedimento de Suspensão)



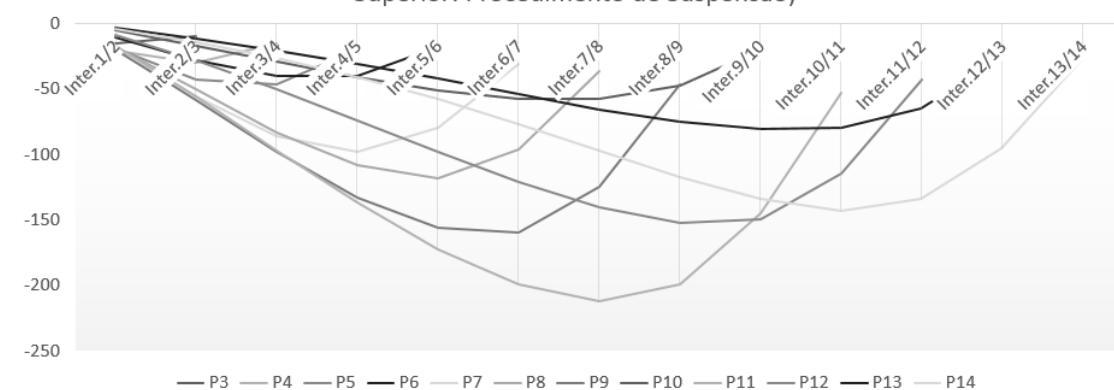
Variação do Diagrama de Momentos com o Peso de Aduelas Previsto (Fibra Superior: Procedimento de Suspensão)

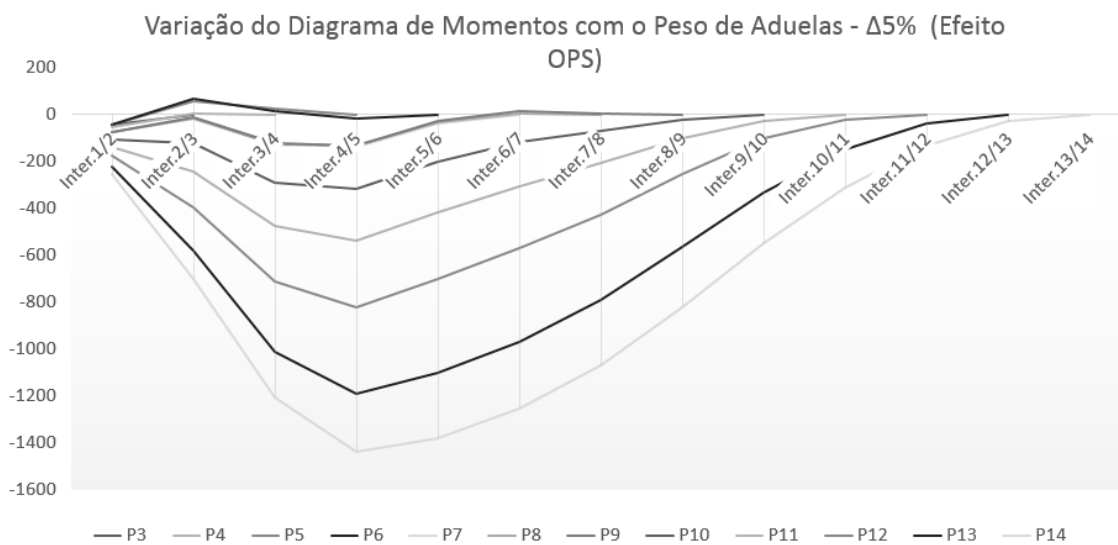
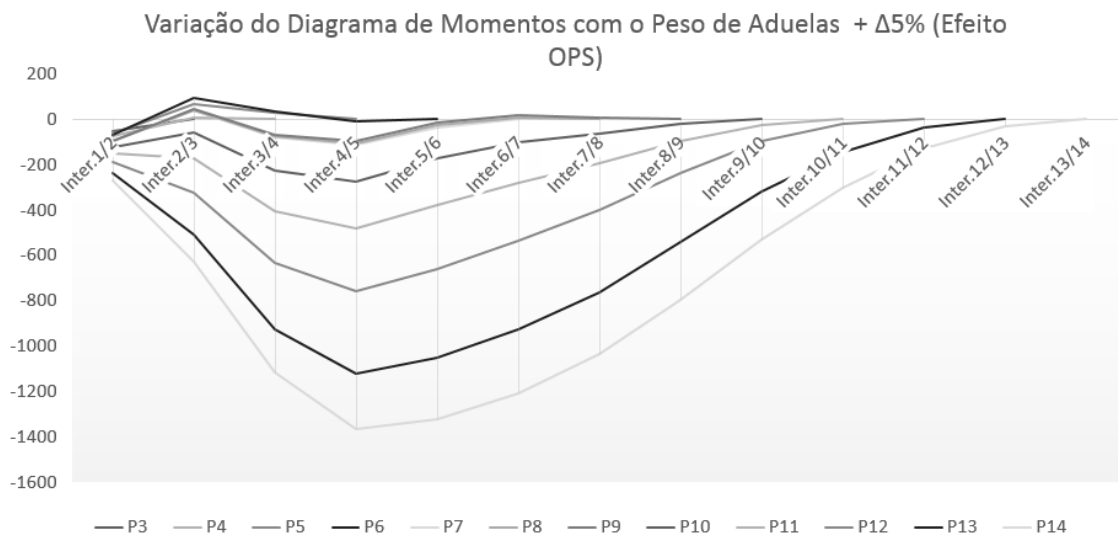
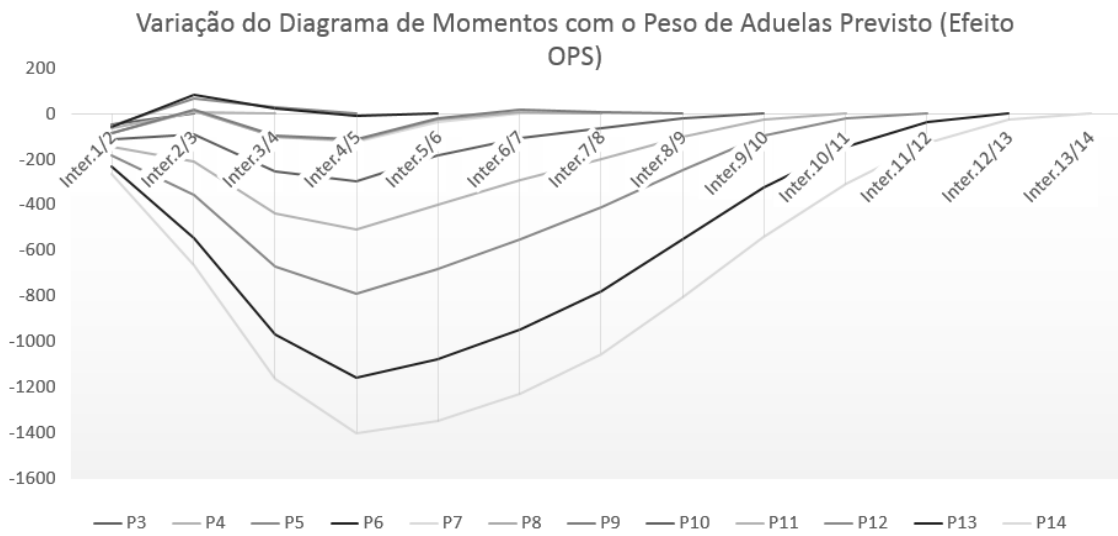


Variação do Diagrama de Momentos com o Peso de Aduelas + $\Delta 5\%$ (Fibra Superior: Procedimento de Suspensão)

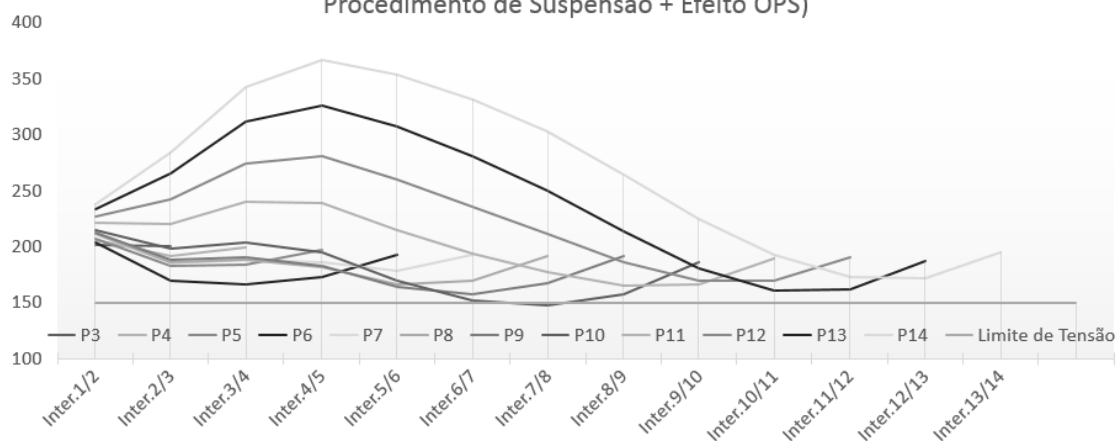


Variação do Diagrama de Momentos com o Peso de Aduelas - $\Delta 5\%$ (Fibra Superior: Procedimento de Suspensão)

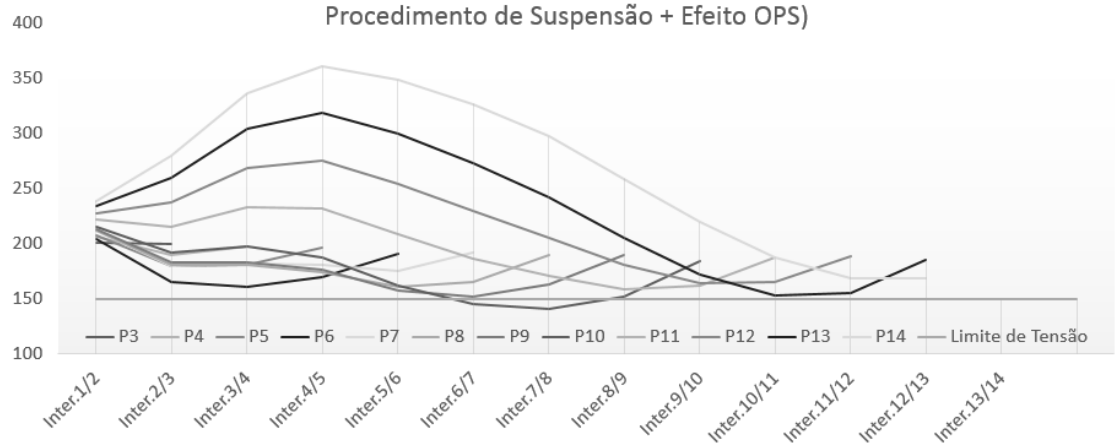




Varição das Tensões com o Peso de Aduelas Previsto (Fibra Inferior:
Procedimento de Suspensão + Efeito OPS)



Varição das Tensões com o Peso de Aduelas + $\Delta 5\%$ (Fibra Inferior:
Procedimento de Suspensão + Efeito OPS)



Varição das Tensões com o Peso de Aduelas - $\Delta 5\%$ (Fibra Inferior:
Procedimento de Suspensão + Efeito OPS)

